



CARLOS ADEMIR DA SILVA

**DIAGNÓSTICO DE FALHA EM UM CILINDRO VIBRADOR
DE VARETAS DE UMA COLHEDORA DE CAFÉ**

LAVRAS – MG

2020

CARLOS ADEMIR DA SILVA

**DIAGNÓSTICO DE FALHA EM UM CILINDRO VIBRADOR DE VARETAS DE UMA
COLHEDORA DE CAFÉ**

Tese apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Programa de Pós-graduação em Engenharia Agrícola, para a obtenção do título de Doutor.

Prof. Dr. Ricardo Rodrigues Magalhães

Orientador

Prof. Dr. Ednilton Tavares de Andrade

Coorientador

LAVRAS – MG

2020

**Ficha catalográfica elaborada pelo Sistema de Geração de Ficha Catalográfica da Biblioteca
Universitária da UFLA, com dados informados pelo(a) próprio(a) autor(a).**

Silva, Carlos Ademir da.

Diagnóstico de falha em um cilindro vibrador de varetas de
uma colhedora de café / Carlos Ademir da Silva.

181 p. : il.

Orientador(a): Ricardo Rodrigues Magalhães.

Coorientador(a): Ednilton Tavares de Andrade.

Tese (doutorado) - Universidade Federal de Lavras, 2019.

Bibliografia.

1. colhedora de café. 2. vibrações mecânicas. 3. análise de
tensões. I. Magalhães, Ricardo Rodrigues. II. Andrade, Ednilton
Tavares de. III. Título.

CARLOS ADEMIR DA SILVA

DIAGNÓSTICO DE FALHA EM UM CILINDRO VIBRADOR DE VARETAS DE UMA COLHEDORA DE CAFÉ

DIAGNOSIS OF FAILURE IN A VIBRATOR CYLINDER OF STRAPS OF A COFFEE HARVES

Tese apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Programa de Pós-graduação em Engenharia Agrícola, para a obtenção do título de Doutor.

APROVADA em 20 de dezembro de 2019.

| | |
|--|----------------|
| Prof. Dr. Ricardo Rodrigues Magalhães | UFLA |
| Prof. Dr. Ednilton Tavares de Andrade | UFLA |
| Prof. Dr. Fábio Lúcio Santos | UFLA |
| Prof. Dr. Carlos Alberto Carvalho Castro | CEFET-VARGINHA |
| Dr. Luiz De Gonzaga Ferreira Júnior | LDGTeCA-Ltda |

Prof. Dr. Ricardo Rodrigues Magalhães
Orientador

Prof. Dr. Ednilton Tavares de Andrade
Coorientador

**LAVRAS – MG
2020**

Dedico este trabalho a minha esposa, Darléia Ângela de Paula Silva, pela compreensão e, apoio, durante todo o tempo que precisei estar afastado da família.

AGRADECIMENTOS

A Deus, por ter me dado força, paciência e perseverança, para que este trabalho pudesse ser realizado. Aos meus pais e irmãos.

À minha esposa, Darléia Ângela de Paula Silva, por me apoiar e compreender nos momentos mais difíceis da minha vida;

Ao professor Ricardo Rodrigues Magalhães, pela orientação, e ao professor Ednilton Tavares de Andrade, pela dedicação e ensinamentos transmitidos;

Ao Departamento de Engenharia Agrícola e à Coordenação do Programa de Pós-Graduação pela oportunidade de realização deste trabalho.

Aos professores do Programa da Pós-Graduação – UFLA-, pelos conhecimentos transmitidos.

Aos colegas, especialmente a Alexandre Assis Rezende Santos, Alexandre Santos Vieira, Andre Luis Goncalves Costa, Carlos Antônio Rufino, Carlos Henrique Lara, Cíntia Ribeiro Andrade, Cláudio Eugênio Pinto, Bruno Vicentini, Fábio Júnior, Geovana Espure, Henrique Pedreira Scotini, Israel Teodoro Mendes, Ivan dos Santos, Jader Bôsko Gomes, Janio Macedo dos Campos, João Paulo de Lima Mendonça, José Carlos, José Elias de Oliveira, Juliana Loreçone Botega, Júlio César de Paiva, Leomar Santos Marques, Luciano Machado Cavalca, Luiz De Gonzaga Ferreira Júnior, Marcio Vladimir Santana, Mariane Aparecida da Luz Paula, Neusa, Nilton Silva, Reginaldo Barbosa Fernandes, Thayrone Conti Serafini Agular, Wagner Eduardo de Souza Pedroso, Walisson Rosalvo Salvador Guimarães, Wander de Assis Prado e Wilson Tobias da Silva, pela colaboração e amizade.

À Empresa Bobinadora Lavrese pela equipe que forneceu apoio técnico.

Ao Senai – Centro Técnico de Fundação Marcelino Corradi – Cetef, pela a equipe dos Engenheiros e Técnicos, na colaboração de análise químicas e dos ensaios mecânicos.

Ào Cefet – Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, pela liberação do espaço físico, para eu poder preparar os corpos de provas (CPs) e construção do protótipo da colhedora de café e, pelo apoio e o afastamento das atividades acadêmicas. Aos professores, por terem aceitado fazer parte da banca examinadora. A todos os que, de alguma forma, colaboraram para a concretização deste trabalho..

"Nada do que foi será de novo do jeito que já foi um dia" Lulu Santos

RESUMO

As colhedoras de café trabalham com um sistema de vibração para promover a derriça dos frutos. O sistema de vibração, geralmente, é acoplado na extremidade de um eixo, denominado por cilindro vibrador de varetas. Esse cilindro pode apresentar falhas, em campo, as quais, geralmente, ocorrem, por fratura no contorno do cilindro de varetas, com um ângulo de aproximadamente, 45° . Observa-se, em campo, que esse tipo de falha ocorre em um curto intervalo de tempo, aproximadamente, de 1669h a 2496h de trabalho constante de 8h por dia, o que requer diagnóstico de falhas. Nesse sentido, este trabalho tem como objetivo principal realizar um diagnóstico de falha em um cilindro vibrador de varetas de uma colhedora de café. Para isso, foi realizado, primeiramente, o mapeamento da fratura e, em seguida, foram confeccionados corpos de provas para a realização de ensaios mecânicos não destrutivos e destrutivos.

Por meio desses ensaios, observaram-se problemas de soldagem entre o cilindro de varetas e flange maior, no qual é acoplado o sistema de vibração do cilindro de varetas. Além de possuir uma parede fina de material com espessura de apenas 10 mm, no processo de produção, o cilindro é usinado para facilitar a montagem do sistema de vibração. O flange maior tem espessura superior ao cilindro de varetas (35 mm), o que dificulta o processo de soldagem, podendo surgir defeitos em decorrência disso.

Diante da incidência de defeitos provenientes do material do tubo vibrador, foi, então, sugerido trabalhar com um protótipo, para preservar a colhedora do fazendeiro. Sendo assim, foi dimensionado um protótipo da colhedora em escala reduzida de 3:1, o qual foi instrumentado, utilizando extensômetros unidirecional e acelerômetro, no intuito de coletar informações de vibração e concentração de tensão na região avaliada do cilindro, para representar utilizou-se um inversor de frequência, para realizar, exatamente, as vibrações, no cilindro vibrador da colhedora de produção real. Por meio de aquisição de dados do protótipo foi possível realizar o diagnóstico e prevenção de falhas, no cilindro de varetas, além de validar simulações numéricas via Método dos Elementos Finitos.

Baseado nos resultados obtidos, como os defeitos de fundição do tubo, do procedimento de soldagem incorreto e da vibração cíclica. Portanto, conseqüentemente, favoreceu a propagação da trinca, no tubo vibrador de varetas e os resultados da extensometria comparado com a simulação numérica mostrou que as tensões ficaram quase iguais, com poucas variações. Diante de uma gama de defeitos, concluímos que foram os que levaram o tubo vibrador de varetas à fadiga.

Para se evitar essa ocorrência, foi sugerida uma RQPS e EPS, respectivamente (Registro de Qualificação de Procedimento de Soldagem) (Especificação do Processo de Soldagem), no intuito de melhorar o processo de fabricação do cilindro vibrador de varetas e não comprometer a vida útil da colhedora.

Palavras-chave: colhedoras de café, vibrações mecânicas, análise de tensões.

ABSTRACT

Coffee harvesters operate with a vibration system to promote fruit spilling. The vibration system is usually coupled to the end of an axis, denominated a rod vibrating cylinder. This cylinder can fail in the field, which generally occurs due to fracture in the contour of the rod cylinder, with an angle of approximately 45° . This type of failure in the field occurs in a short period, from approximately 1669 hours to 2496 hours of constant work, 8 hours per day, which requires a failure diagnosis. In this sense, this work has as the primary objective of diagnosing fails in a rod vibrating cylinder of a coffee harvester. For this, we first mapped the fracture, and, subsequently, developed samples to perform non-destructive and destructive mechanical tests. These tests showed welding issues between the rod cylinder and the larger flange, to which the rod cylinder vibration system is coupled. In addition to presenting a thin wall of material with a thickness of only 10 mm, during the production process, the cylinder is machined to facilitate the assembly of the vibration system. The larger flange is thicker than the rod cylinder (35 mm), which makes the welding process more difficult, and defects may arise as a result. In view of the incidence of defects from the material of the vibrating tube, we suggested working with a prototype, to preserve the farmer's harvester. Therefore, we designed a prototype of the harvester in a reduced scale of 3:1, which was instrumented using an unidirectional strain gauges and an accelerometer to collect information on the vibration and tension concentration in the evaluated region of the cylinder, using a frequency inverter to perform the exact vibrations that occur in the vibrating cylinder of the production harvester. The prototype data allowed us to diagnose and prevent fails in the rod cylinder, as well as to validate numerical simulations via the Finite Element Method. Based on the results obtained in the laboratory analysis, such as the tube casting defects, the welding procedure is incorrect, with the entire set having been subjected to cyclic vibrations, consequently favoring the propagation of cracks in the rod vibrating cylinder. The results of the extensometry showed that the stresses were almost equal, with few variations, when compared to the numerical simulation. Due to a range of defects, we conclude that they were what caused the rod vibrating cylinder to fail. To avoid this, we suggest a Welding Procedure Qualification Record and Welding Process Specification to improve the manufacturing process of the rod vibrating cylinder and not compromise the harvester's useful life.

Keywords: coffee harvesters, mechanical vibrations, stress analysis

LISTA DE FIGURAS

| | |
|--|----|
| Figura 3.1 – Diagrama de equilíbrio ferro carbono. | 18 |
| Figura 3.2 – Microestrutura presentes em regiões da solda em função da temperatura. . . | 19 |
| Figura 3.3 – Teor de hidrogênio difusível nos processos de soldagem pelo IIW. | 20 |
| Figura 3.4 – Gráfico tensão-deformação. | 24 |
| Figura 3.5 – Exemplos de Strain Gauges | 24 |
| Figura 3.6 – Estágios de propagação de uma trinca por fadiga. | 26 |
| Figura 3.7 – Marcas de praia. | 27 |
| Figura 3.8 – Marcas de praia. | 28 |
| Figura 3.9 – Marcas de catraca. | 28 |
| Figura 3.10 – Estrias. | 29 |
| Figura 3.11 – Curva S-N | 31 |
| Figura 3.12 – Liberação de energia devido ao crescimento de uma trinca | 32 |
| Figura 3.13 – Representação de uma trinca no centro da chapa. | 33 |
| Figura 3.14 – Comparação esquemática do comportamento tensão-deformação de mate- riais elásticos não lineares e materiais elastoplásticos. | 34 |
| Figura 3.15 – Efeito da plasticidade sobre o campo de tensão na ponta da trinca. | 35 |
| Figura 3.16 – Integral J | 37 |
| Figura 3.17 – Representação esquemática da curva de resistência de um material. A pri- meira apresenta um valor constante de R, enquanto a segunda apresenta um comportamento crescente que ocasiona um crescimento estável da trinca antes da fratura. | 38 |
| Figura 3.18 – Crescimento estável da trinca antes da fratura. | 39 |
| Figura 3.19 – Simulação de fratura utilizando a integral J no software ANSYS. | 39 |
| Figura 3.20 – Simulação da estrutura de uma colhedora de café automotriz | 41 |
| Figura 4.1 – Colhedora de Café. | 43 |
| Figura 4.2 – Sistema mecânico das duas colhedoras de Café. | 44 |
| Figura 4.3 – Usinagem realizada na parede interna do cilindro de varetas vibrador . . . | 45 |
| Figura 4.4 – Corte longitudinal para identificar a área da seção transversal da solda do cilindro de varetas com a flange (B) posição horizontal e (B) vertical . . . | 47 |
| Figura 4.5 – (A) Comprimento total do cilindro e B) Cilindro fraturado em ângulo de aproximadamente 45° | 48 |

| | |
|--|-----|
| Figura 4.6 – Trinca na ZTA, com presença de mordedura | 48 |
| Figura 4.7 – A) Marcação próxima à trinca para retirada dos CPs, B) cilindro após retirada dos corpos de provas (1- próximo à trinca para análise química, 2- na região soldada para ensaio metalográfico e 3 - entre a flange e o cilindro de varetas para ensaio de tração). | 49 |
| Figura 4.8 – CP A Trinca para o MEV e o CP B para análise química e dureza Brinell. | 50 |
| Figura 4.9 – Região do cilindro de varetas vibrador fraturada para análise MEV. | 50 |
| Figura 4.10 – CP B preparado para análise química | 51 |
| Figura 4.11 – CP4 para análise química do flange | 51 |
| Figura 4.12 – CPs para ensaio de tração com sobre-metal. | 52 |
| Figura 4.13 – CPs preparados para os ensaios de tração. | 52 |
| Figura 4.14 – CPs preparados para o ensaio de tração. | 53 |
| Figura 4.15 – CP A para o MEV Trinca e o CP B para análise química. | 53 |
| Figura 4.16 – Projeto em escala 1:3 da colhedora de café. | 55 |
| Figura 4.17 – Protótipo em escala. | 56 |
| Figura 4.18 – As quatro posições críticas para a colagem do extensômetro no cilindro. | 58 |
| Figura 4.19 – Ponte de Wheatstone. | 59 |
| Figura 4.20 – Calibração. | 61 |
| Figura 4.21 – Coleta de dados com acelerômetro e extensômetro. | 62 |
| Figura 1 – Calibração do inversor de frequência com a colhedora | 170 |
| Figura 2 – Resultados do acelerômetro 20 Hz | 170 |
| Figura 3 – Resultados do acelerômetro 23 Hz | 171 |
| Figura 4 – Resultados do acelerômetro 25 Hz | 172 |
| Figura 5 – Resultados dos extensômetros direções em uma frequência de 12.5 Hz | 180 |
| Figura 6 – Resultados dos extensômetros direções em uma frequência de 14.2 Hz | 180 |
| Figura 7 – Resultados dos extensômetros direções em uma frequência de 15.8 Hz | 181 |

LISTA DE TABELAS

| | |
|---|----|
| Tabela 4.1 – Descrição da colhedora de café | 54 |
|---|----|

LISTA DE SIGLAS

| | |
|-------------------|--|
| At | Aporte Térmico |
| ASTM | <i>American Society for Testing and Materials</i> |
| C | Carbono |
| CaCO ₃ | <i>Carbonodeclcio</i> |
| CE | Carbono Equivalente |
| Cr | Cromo |
| CP | Corpo de Prova |
| CPs | Corpos de prova |
| CTOD | <i>Crack Tip Opening Displacement</i> |
| Cu | Cobre |
| EPS | Especificação de Procedimento de Soldagem |
| FFT | Transformada Rápida de Fourier |
| GF | Grãos finos |
| GG | Grãos grosseiros |
| GMAW | <i>Gas Metal ArcWelding</i> |
| GPa | Giga Pascal |
| H ⁺ | <i>Hidrogênio atômico</i> |
| HB | Dureza Brinell |
| HV | Dureza Vickers |
| IIW | <i>International Institute of Welding</i> |
| MAG | <i>Metal Active Gas</i> |
| MEF | Método dos Elementos Finitos |
| MIG | <i>Metal Inert Gas</i> |
| Mn | Manganês |
| Mo | Molibidênio |
| MPa | Mega Pascal |
| Ni | Níquel |
| Pa | Pascal |
| RQPS | Registro de Qualificação de Procedimento de Soldagem |
| S-N-Stress | Vida |
| UFLA | Universidade Federal de Lavras |

V Vanádio
ZTA Zona termicamente afetada

SUMÁRIO

| | | |
|--------------|---|-----------|
| 1 | INTRODUÇÃO | 14 |
| 2 | OBJETIVOS | 15 |
| 3 | REFERENCIAL TEÓRICO | 16 |
| 3.1 | Produção agrícola | 16 |
| 3.2 | Processo para fabricação de máquinas agrícolas | 16 |
| 3.3 | Estudo das vibrações | 21 |
| 3.4 | Sistema de aquisição de dados para análise de deformações | 23 |
| 3.5 | Estudo da fadiga e fratura | 25 |
| 3.5.1 | Falha por fadiga | 25 |
| 3.5.2 | Propagação de uma trinca por fadiga | 26 |
| 3.5.3 | Mecânica da fratura linear elástica | 29 |
| 3.6 | O desenvolvimento da integral J | 33 |
| 3.6.1 | Dedução da Integral J | 36 |
| 3.6.2 | A Integral J aplicada ao software numérico | 38 |
| 3.7 | Análise de vibração pelo método dos elementos finitos | 40 |
| 4 | METODOLOGIA | 42 |
| 4.1 | Descrição do problema | 42 |
| 4.1.1 | Colhedora de café | 42 |
| 4.1.2 | Sistema mecânico | 43 |
| 4.1.3 | O tubo do cilindro vibrador de varetas | 45 |
| 4.1.4 | Cilindro vibrador | 47 |
| 4.2 | Diagnóstico da falha | 47 |
| 4.2.1 | Análise laboratorial | 49 |
| 4.2.2 | Retiradas dos Corpos de Provas (CPs) | 49 |
| 4.3 | Projeto e prototipagem de uma colhedora em escala reduzida | 54 |
| 4.4 | Sistema de aquisição de dados para leituras de deformação | 56 |
| 4.4.1 | Desenvolvimento da ponte de Wheatstone para os extensômetros | 58 |
| 4.4.2 | Preparação do sistema para calibração dos extensômetros | 59 |
| 4.4.3 | O processo de calibração dos extensômetros | 60 |
| 4.5 | Sistema de aquisição de dados para leituras de aceleração e deformação | 61 |
| 5 | CONCLUSÕES | 63 |

| | |
|---|------------|
| SEGUNDA PARTE | 69 |
| ARTIGO 1 - ANÁLISE EXPERIMENTAL EM UM CILINDRO DE VARE- TAS DE UMA COLHEDORA DE CAFÉ PARA DIAGNÓSTICO DE FALHA | 70 |
| | |
| SEGUNDA PARTE | 92 |
| ARTIGO 2 - DEVELOPING A SCALING COFFEE HARVEST FOR TES- TING BENCH | 93 |
| APENDICE A – Relatórios de análises | 107 |
| APENDICE B – Resultados das leituras de aceleração | 170 |
| APENDICE C – Calibração e resultados das leituras de deformações | 173 |

1 INTRODUÇÃO

A mecanização agrícola, em grande escala, ocorreu a partir da utilização de máquinas e colhedoras empregadas na agricultura, após a segunda guerra mundial. A colheita do café, até pouco tempo atrás, era realizada manualmente ou de forma semimecanizada. A colheita manual pode danificar a lavoura, se comparada com a colheita mecanizada, além da baixa produtividade para a realidade brasileira. Com o desenvolvimento tecnológico ocorrido, nos últimos tempos, foi possível desenvolver tratores e colhedoras de grande porte. Com isso, máquinas que realizam derriça do fruto de café são cada vez mais comuns. Elas, porém, trabalham em uma determinada faixa de frequência de vibração, para atingir valores de ressonância do pedúnculo do fruto de café. Isso provoca a derriça do fruto, mais o impacto com as varetas. Essa vibração é constante e necessária, porém, pode ser prejudicial para a vida útil de componentes das colhedoras.

Atualmente, as indústrias nuclear, naval, petrolífera, automobilística e agrícola, inclusive, apresentam uma preocupação quanto à qualidade da solda empregada nos respectivos equipamentos. A escolha do processo de soldagem e do procedimento a ser empregado, no equipamento, vem garantir êxito e uma boa qualidade do produto final. O processo de soldagem garante a resistência mecânica do equipamento, tendo em vista que máquinas agrícolas trabalham, geralmente, com um motor diesel de tração ou um trator para realizar o trabalho de transmissão para o sistema mecânico das colhedoras de café. Além do sistema mecânico de vibração para derriça. Esse e outros componentes, como condições adversas do terreno, o próprio cilindro vibrador, todo o conjunto pode provocar vibrações em sua estrutura, que se estende por toda máquina. Apesar de serem usados coxins de borracha para absorver vibração, verifica-se que podem ocorrer fraturas em sua estrutura ou, até mesmo, danos em alguns componentes do sistema mecânico em decorrência de vibrações.

Nesse sentido, com o presente trabalho, pretende-se realizar um diagnóstico de falha ocorrida em um cilindro vibrador de uma colhedora de café. Para isso, realizaram-se testes de dureza do material, análise do tipo de fratura, análise química do material, procedimento de soldagem e análise de deformações do eixo na região da solda. Além disso, o Método dos Elementos Finitos foi empregado para auxiliar as análises. A partir das análises realizadas, foi possível identificar possíveis causas da falha e auxiliar no projeto dessa colhedora de café, com algumas melhorias no processo, contribuindo para o desenvolvimento de produtos agrícolas.

2 OBJETIVOS

Conduziu-se, este trabalho, com o objetivo de realizar um diagnóstico de falha em um cilindro vibrador de varetas de uma colhedora de café. Para esse fim, foram estabelecidos como objetivos específicos:

- Avaliar o processo de soldagem entre a flange e o cilindro vibrador, por meio de análises químicas, ensaios de tração, metalografia e dureza dos materiais;
- Avaliar as tensões envolvidas no cilindro de varetas, por meio de simulações numéricas;
- Propor uma metodologia de acompanhamento e melhorias, durante o processo de fabricação do cilindro vibrador da colhedora de café.

3 REFERENCIAL TEÓRICO

3.1 Produção agrícola

De acordo com a Organização das Nações Unida (ONU) para a Agricultura e Alimentação (AYERS; WESTCOT, 1999), o crescimento da produção agrícola, nos últimos 50 anos, foi superior ao crescimento da população. No setor agrícola, vários estudos relacionam a análise de desempenho estatístico da produção agrícola e os indicadores de fome no mundo. Está sendo experimentada, na agricultura, uma metodologia de Qualidade das Operações de Preparo de Solo por Controle Estatístico de Processo que, inicialmente, era utilizada somente nas indústrias. São resultados e indicadores operacionais de controle do trabalho diário, dos quais obtiveram-se alguns indicadores com respeito a qualidade de produção diária na área agrícola (MILAN; FERNANDES, 2002).

Alguns autores já se referem a uma metodologia básica para medir a eficiência do uso de máquinas agrícolas. SOFFNER e BALASTREIRE () destacam a qualidade da manutenção de uma frota. BRITO e BRITO (2000) esclarece sobre o índice de Qualidade de Vida (QVT) e da qualidade do processo de produção.

3.2 Processo para fabricação de máquinas agrícolas

As máquinas agrícolas são fabricadas, normalmente, em aço carbono, conforme Normas SAE (Society of Automotive Engineers), ou ASTM (American Society for Testing and Materials), similar ao SAE 1010 (CALLISTER, 2002) ou ASTM A36 (AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS, 1999), com raras exceções apresentam alguns elementos de liga. Esses materiais são usinados e soldados com pouco ou nenhum controle de qualidade. Na fabricação de máquinas agrícolas, se faz necessário um melhor controle no processo de soldagem a ser empregado. Considerando-se a Elaboração do Procedimento de Soldagem (EPS), com pré-aquecimento e monitoramento entre passes, seguidos de pós-aquecimento e resfriamento controlado da soldagem, o Registro de Qualificação de Procedimento de Soldagem (RQPS) também influencia a qualidade da solda. Seguindo essa linha, é importante salientar que o controle do aporte térmico, durante o processo de soldagem, é realizado, por meio da Equação 3.1, que visa a aliviar tensões e distorções em estruturas soldadas, o que se tornam preponderantes para obter uma boa qualidade no produto acabado, conforme Silva e Bracarense (2003).

$$At = \eta \left(\frac{I.V}{v} \right) \quad (3.1)$$

Onde:

At - Aporte térmico

eta - Rendimento

I - Corrente de soldagem

V - Tensão de soldagem

v - Velocidade de soldagem

A conformidade entre o projeto e o processo de fabricação visa a garantir a qualidade do produto final, principalmente quando soldagem e vibração, em conjunto, estão envolvidos no processo, o que pode comprometer a funcionalidade das máquinas agrícolas. Ainda, conforme Silva e Bracarense (2003), vibrações não são benéficas para equipamentos soldados, assim, faz-se necessário o acompanhamento de um profissional de soldagem com conhecimentos avançados em materiais e processos de soldagem.

A utilização de elementos de liga nos aços, aumenta a dureza do material, consequentemente, sua resistência mecânica. Porém, esses elementos de liga podem deixar o material susceptível a trincas. Baseado nisso, o IIW (International Institute of Welding) utiliza a equação de carbono equivalente (CE), Equação 3.2, para verificar a susceptibilidade de trincas a frio, ou seja, trincas originadas pela presença de hidrogênio no cordão de solda. Gorni e Mei (2003) descrevem a susceptibilidade à ocorrência de trincas na Zona Termicamente Afetada (ZTA), para uma grande variedade de aços, especialmente os utilizados na indústria naval. Apesar de ser uma maneira rápida de avaliar a soldagem de um aço, alguns fatores também devem ser considerados, como a espessura elevada do material a ser soldado e o aporte térmico (energia térmica imposta pelo processo de soldagem).

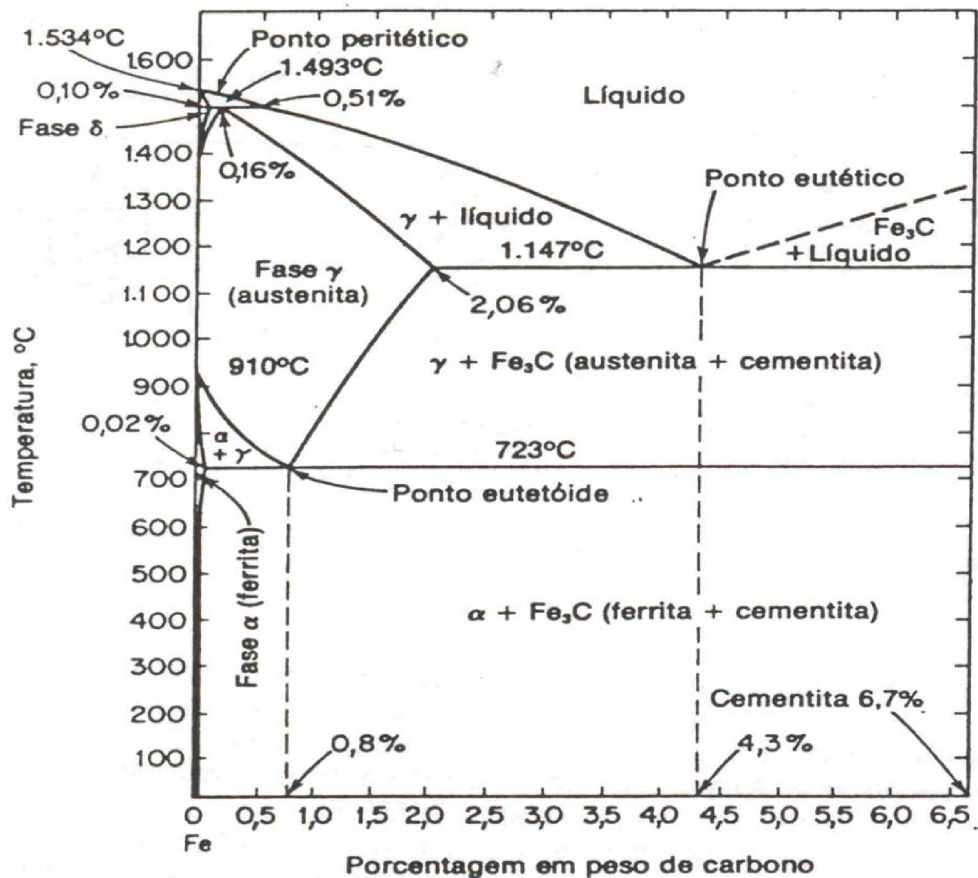
$$CE = C + \frac{Mn}{6} + \frac{Cr + Mo + V}{5} + \frac{Ni + Cu}{15} \quad (3.2)$$

O carbono é o elemento químico que tem maior influência no cálculo do CE. Para aços com baixo teor de carbono (CE baixo), ou seja, menor que 0,45%, o mesmo apresenta boa soldabilidade. Quando o CE apresenta valores entre 0,45% e 0,60%, pode surgir o aparecimento de trincas. Nesse caso, se faz necessária a utilização de pré-aquecimento do material entre 100 °C e 400 °C. Considerando o valor de CE superior a 0,60%, a probabilidade da solda vir a trincar

se torna alta. Para a correção dessa situação, é necessária a utilização de um pré-aquecimento, monitoramento entre passes, pós-aquecimento, seguido de resfriamento controlado do processo de soldagem, podendo ser em forno, estufa, em areia seca ou cal.

Arias e Bracarense (2015) relatam que pequenas influências do meio ambiente favorecem para o aumento da velocidade de propagação de trinca por fadiga. Conforme Marques e Modenesi (2014), a execução da soldagem por soldadores deve ser realizada da mesma forma que o médico realiza uma cirurgia, mantendo limpeza, no sentido de se evitar trincas, pela presença de hidrogênio no cordão de solda. O hidrogênio atômico (H+), por ser um átomo muito pequeno, entra no metal de solda, por meio de sujeira, óleo, graxa, poeira e umidade do ar e se dissocia na austenita. Figura 3.1. O Diagrama de Transformação de Fase Ferro Carbono, em que se pode observar que a região da austenita fica acima da linha crítica, cuja temperatura é de 723 °C até 1493 °C. Essa é uma região localizada à esquerda do diagrama. Nessa temperatura, o aço carbono recebe muita energia e a ferrita e a cementita transformam em austenita.

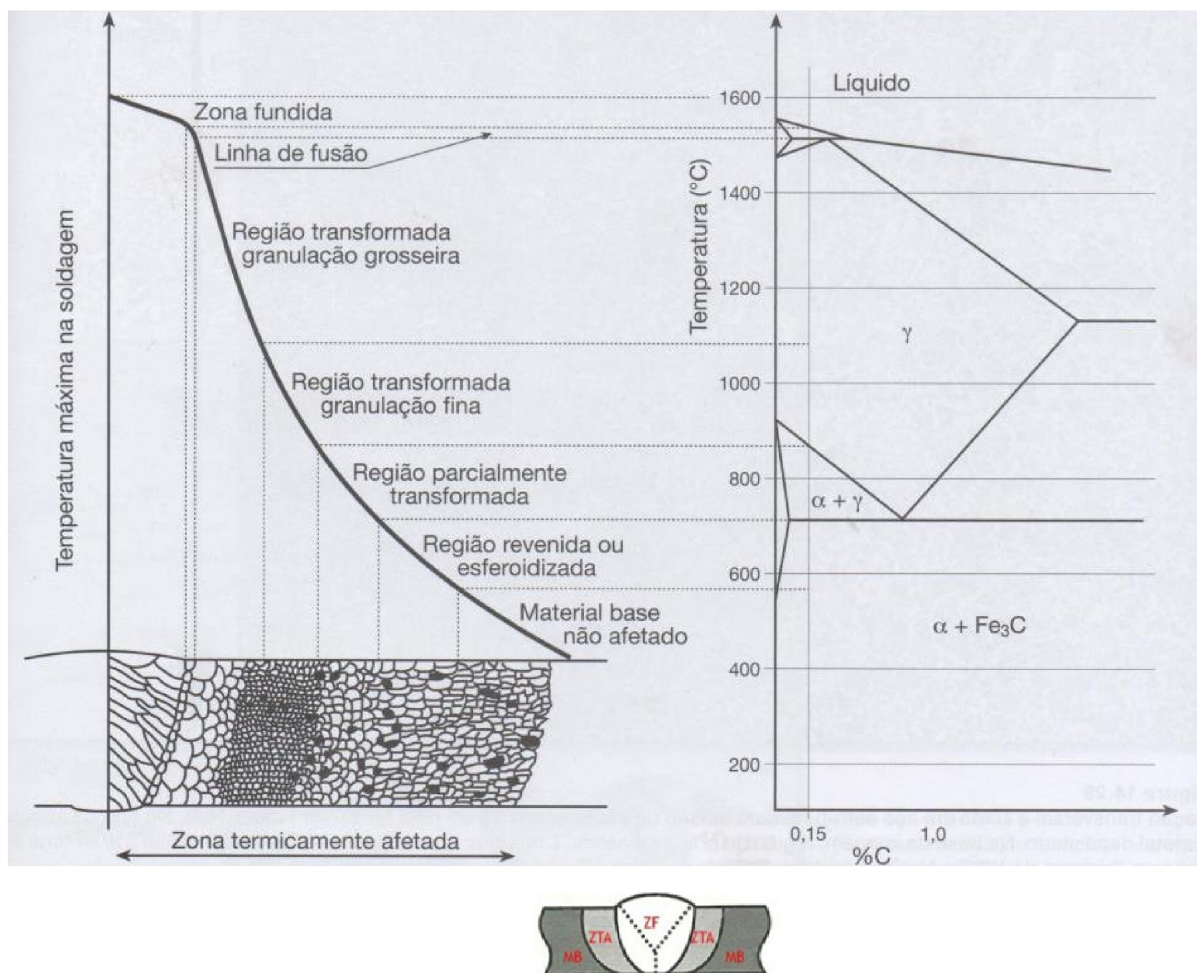
Figura 3.1 – Diagrama de equilíbrio ferro carbono.



Fonte: Chiaverini (1986)

Durante a realização da soldagem, a temperatura imposta pelo processo ultrapassa 3000 °C na poça de fusão. Então, o H+ aproveita essa transformação para se dissociar em austenita, uma vez que, no interior da solda, vai se associar com outro átomo hidrogênio atômico, formando uma cadeia de hidrogênios, no interior do metal. Essa cadeia de hidrogênio gera gás, que, por sua vez, vai provocar uma pressão interna no metal de solda. Esse processo dá origem às denominadas trincas por hidrogênio, principalmente na ZTA (ALBUQUERQUE et al., 2011). Na Figura 3.2, apresenta-se a microestrutura das regiões da solda em função da temperatura.

Figura 3.2 – Microestrutura presentes em regiões da solda em função da temperatura.

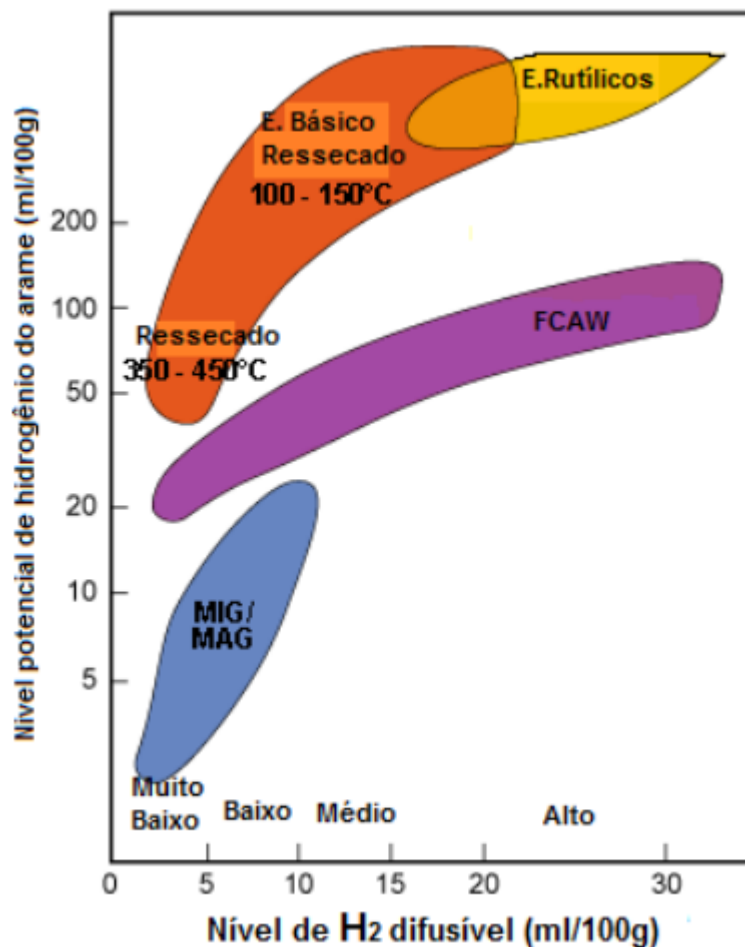


Fonte: adaptado de Albuquerque et al. (2011) e Colpaert, Costa et al. (2008)

O consumível de soldagem também tem influência na qualidade da solda, o qual deve ser secado, em forno a 350 °C, por uma hora e armazenado em estufa com temperatura de 100 a 120 °C, nos casos de soldagem por eletrodo revestido e arame tubular, pois esses consumíveis são higroscópicos, ou seja, possuem a capacidade de absorver água na sua composição química

(revestimento ou fluxo básico, $CaCO_3$). A escolha do processo de soldagem adequado também pode ajudar a evitar o problema de trinca na soldagem. O IIW Instituto Internacional de Soldagem, apresenta uma tabela referenciando alguns processos de soldagem e suas taxas de deposição de hidrogênio difusível no metal de solda, conforme Figura 3.3.

Figura 3.3 – Teor de hidrogênio difusível nos processos de soldagem pelo IIW.



Fonte: Coe (1973)apud Pokhodnya e Shvachko (1996).

A zona fundida da solda é composta por microestrutura diferente das demais encontradas no metal base. Estão presentes no interior da solda, microestruturas austeníticas, em regiões de grãos finos (GF) e de grãos grosseiros (GG) na ZTA. A região de grãos grosseiros é a que merece maior atenção, pois é essa região que recebe um maior aporte térmico, deixando os grãos maiores, portanto, susceptível a trincas. As propriedades mecânicas e metalúrgicas do aço ficam comprometidas com o resfriamento prolongado do material, o que facilita o aparecimento de ferrita e carbeto, provenientes da martensita. A composição química do metal de solda apresenta-se com ferrita acicular, ferrita primária, ferrita de contorno de grão e ferrita

secundária. Esses microconstituintes facilitam a propagação de trincas, prejudicando a resistência mecânica e a tenacidade do metal de solda. Conforme Silva e Bracarense (2003), o mesmo ocorre para soldas em situação de fadiga subaquática. Outro fator importante é a microdureza, na região da solda (JOVANOVIĆ; GRUM; URAN, 2008).

Normalmente, ensaios de microdureza Vickers (HV), na região da solda, apresentam valores na faixa de 180 HV a 240 HV, podendo chegar a 300 HV. Caso isso ocorra, pode-se afirmar que é um local propício a trincas, ou que a impressão da dureza foi sobre a microestrutura chamada de martensita (MARQUES; MODENESI, 2014).

3.3 Estudo das vibrações

Todas as máquinas rotativas apresentam um determinado nível de vibrações, que nem sempre se pode caracterizar como defeito mecânico. Atualmente, muitas máquinas agrícolas atuam, exercendo atividades vibratórias, para realizar determinada atividade, a exemplo da colheita mecanizada do café. É importante salientar que, na manutenção mecânica, de uma maneira geral, já se tem monitoramento de máquinas em tempo real. Dessa forma, qualquer anomalia que possa ocorrer, seja por defeito mecânico ou excitações secundárias, pode agravar. Nesse ponto de vista, a alteração do comportamento vibratório pode ser indício de um defeito, que pode ser, por empenamento, desalinhamento ou desbalanceamento, provocando desgaste e reduzindo a vida útil do equipamento (SOUZA; CICOGLIA; CHIQUITO, 2007). A análise das frequências envolvidas no processo vibratório de uma máquina é idealizada, por meio de uma função matemática desenvolvida pelo físico e matemático francês Jean Baptiste Fourier (1768 – 1830). A transformada de Fourier (JOSEPH, 1822), aplicada a um sinal que se desenvolve, no tempo, faz sua transposição para o domínio da frequência. Essa transformação possibilita a identificação dos diversos componentes de frequência de um sinal, como informações precisas quanto aos valores individuais de amplitude e de possíveis defasagens entre elas. A transformada de Fourier, para sinais contínuos que se desenvolvem desde $-\infty$ até $+\infty$, na forma complexa, é dada pela Equação 3.3, e a Equação 3.4 é uma parte desta equação.

$$\chi(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t) e^{-i\omega t} dt \quad (3.3)$$

em que: $\chi(\omega)$ é uma função complexa da frequência (Hz) em que a Transformada de Fourier de $x(t)$, seja absolutamente integrável.

$$i = \sqrt{-1}e\chi(\omega) \quad (3.4)$$

em que: ω é a frequência (Hz) e t é o tempo (s).

A visualização do espectro de frequência é importante para a análise de vibração em equipamentos rotativos. Isso possibilita associar as componentes de frequência e sua amplitude aos componentes mecânicos do equipamento, dando subsídio para o diagnóstico das causas da vibração. Por meio de métodos computacionais, foi desenvolvida a Transformada Discreta de Fourier, que trabalha com o sinal no domínio do tempo na forma discreta. A agilidade dos cálculos possibilitou o desenvolvimento de analisadores de sinais portáteis equipados com a Transformada Rápida de Fourier (FFT). É, a partir dessa técnica que, sinais provenientes de amostras no domínio do tempo, podem ser convertidas para o espectro de frequências, composto de valores distintos (MESQUITA et al., 2002), (Equação 3.5).

$$\chi(m) = \sum_{n=0}^{Na-1} \chi(n) e^{i2\pi(nm/Na)} \quad (3.5)$$

em que: N é o número de pontos amostrados; $x(n)$ é o conjunto de pontos que represente o sinal no tempo; $X(m)$ é o resultado da FFT de um sinal discretizado, no domínio do tempo, com m bandas discretas (SOUZA; CICOGNA; CHIQUITO, 2007).

Os conceitos sobre a teoria da vibração já são conhecidos há décadas, no entanto, só foram utilizados em equipamentos mecânicos, com o desenvolvimento dos equipamentos eletrônicos mais sofisticados. As pesquisas tiveram um grande avanço, a partir do uso da análise de sinais e geração de dados, o que facilitou o entendimento de como as vibrações se comportam. Esse fato permitiu a execução da manutenção com custos decrescentes e com baixas ocorrências de falhas repentinas de equipamentos (MESQUITA et al., 2002).

Com o desenvolvimento da manutenção preditiva, no final dos anos 70, houve uma evolução da análise de vibrações, no intuito de acompanhar as condições operacionais dos equipamentos mecânicos. Pela popularização da análise de vibração, como técnicas empregadas em manutenção industrial, facilitou-se o surgimento dos primeiros coletores portáteis de vibrações (MESQUITA et al., 2002).

Com a entrada desses equipamentos elétricos e eletrônicos, abriu-se um caminho para a aplicação de novas tecnologias, as quais vêm sendo difundidas nas mais diversas linhas de pesquisa, é a aplicação de redes neurais e inteligências artificiais no fenômeno de vibração.

A observação do nível de vibração, ao longo do tempo, permite identificar quando a intensidade de vibração, taxa de repetição de um determinado fenômeno, suavidade ou rapidez com que as mudanças de direção e sentido ocorrem. A ocorrência de alterações, na forma, original do sinal, pode indicar o início de um mecanismo de falha no equipamento (MESQUITA et al., 2002).

Segundo WANZELER et al. (2013), as observações da indústria dos Estados Unidos da América, no monitoramento de turbo geradores, identificam que os limites de alarme praticados com base na experiência das equipes de manutenção, tendem a ser mais conservativos que o padrão internacional estipulado pela norma 7919 (ISO,2009) (KUEMMLEE; GROSS; KOLERUS, 2013). (COSTA; MATHIAS, 2011) apresentaram o sinal de vibração, ao longo do tempo de um rolamento com defeitos pré-determinados.

Segundo Almeida, Abrahão e Tereso (2015) e Santos et al. (2003), a vibração para o ser humano pode lhe trazer danos fisiológicos que agridem os músculos, a respiração e aspectos fisiológicos no trabalho. Visto que, em níveis mais elevados, traz desconforto visual e psicomotor, danos aos tendões, juntas e ossos. As vibrações, portanto, constituem tanto um benefício assim como um malefício, mas faz-se necessário encontrar um meio termo e utilizar as vibrações para o bem-estar do operador e em benefício das máquinas.

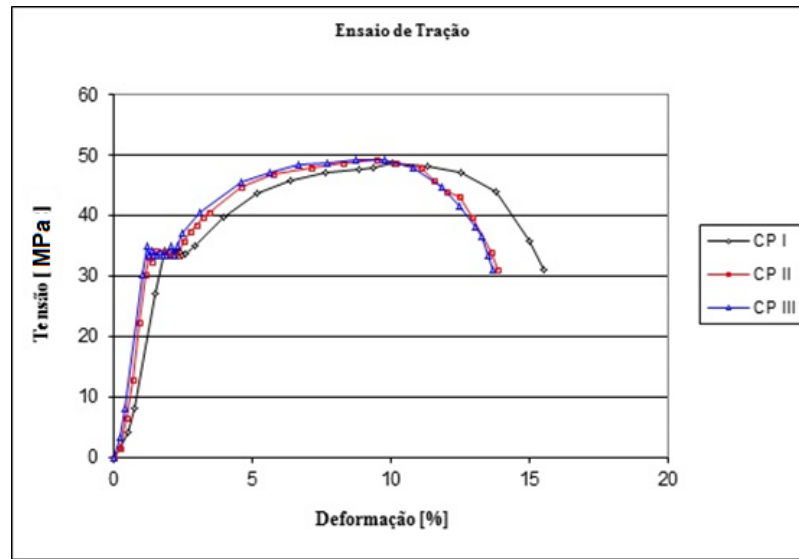
3.4 Sistema de aquisição de dados para análise de deformações

Quando um corpo sofre ação de uma força qualquer externa, o mesmo se deforma. Em condições normais, o material em deformação permanece no regime elástico, ou seja, região linear elástica. O gráfico tensão-deformação descreve esse comportamento dos materiais metálicos em geral. Nesse caso, a extensometria tem contribuído para a medição dessas deformações. Um gráfico tensão-deformação, como exemplo, contendo a parte linear elástica e a deformação plástica é apresentado na Figura 3.4.

Um dos sensores mais utilizados para medir deformação de um material é o extensômetro, conhecido por Strain Gauge. O Strain Gauge é fabricado em material com certa resistência elétrica. Esse material é produzido por um fino filamento metálico sobre um material isolante, geralmente epoxi, conforme Figura 3.5.

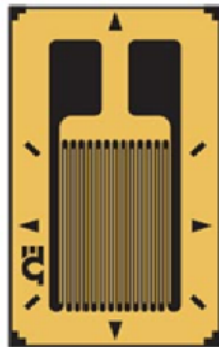
Esse sensor é colado, na superfície do material que, ao se deformar, varia a resistência elétrica do filamento, conforme Equação 3.6.

Figura 3.4 – Gráfico tensão-deformação.

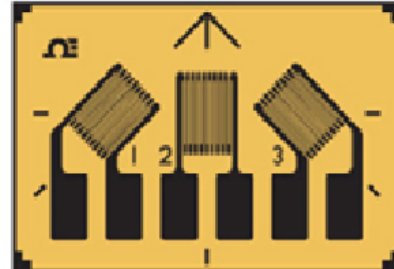


Fonte: SILVA e BRACARENSE (2003)

Figura 3.5 – Exemplos de Strain Gauges



Strain Gauge Linear



Strain Gauge de Roseta

Fonte: Catálogo do fabricante EXCEL SENSORES (2019)

$$R = \rho \cdot \frac{L}{A} \quad (3.6)$$

Em que: R é a resistência elétrica em Ω ,

ρ é a resistividade do material;

L e o comprimento do filamento em m;

e A é a área da seção transversal do filamento em m^2 .

Geralmente, os extensômetros são inseridos no circuito eletrônico, por meio de pontes de Wheatstone. A ligação de uma ponte de Wheatstone com os extensômetros converte a resis-

tência elétrica em sinal de tensão elétrica, que pode ser aferida, de acordo com a força aplicada no material.

3.5 Estudo da fadiga e fratura

3.5.1 Falha por fadiga

Equipamentos sujeitos a carregamentos cíclicos, ou seja, cargas com variação de intensidade e/ou direção, ao longo do tempo, tendem a experimentar a variação das tensões atuantes nas peças (D'IPPOLITO et al., 2009). Esses valores de tensão podem atingir níveis que, mesmo menores do que os valores admissíveis de projeto dos equipamentos, possibilitam o aparecimento de pequenas trincas, podendo levar à ruptura do componente, desde que a variação de tensão se repita por um número elevado de vezes. Esse tipo de falha é denominado de falha por fadiga. Nesse caso, a ocorrência em componentes sob a ação de cargas cíclicas pode gerar falhas por fadiga. A norma ASTM E1150 define o termo fadiga como:

“o processo de mudança estrutural progressiva localizada e permanente que ocorre em um material sujeito a condições que produzam tensões e deformações flutuantes em um ponto ou pontos do material e que possam culminar em trincas ou na fratura completa após um número suficiente de flutuações”. (ASTM, 2000 apud MANSUR et al., 2011, p.274).

Conforme Caminaga e Button (2013), três fatores básicos são necessários para causar a falha por fadiga:

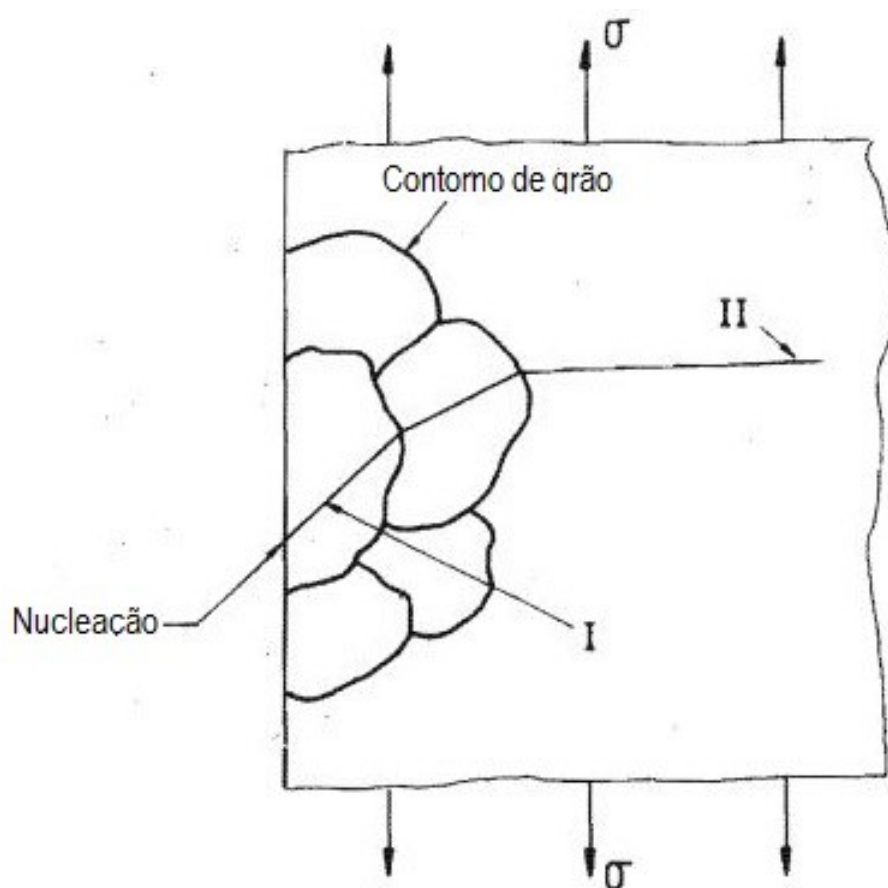
- Uma tensão de tração de valor consideravelmente alta;
- Uma variação ou flutuação relativamente grande da tensão aplicada;
- Um número suficientemente grande de ciclos de tensão aplicada.

Outras variáveis podem influenciar o processo de fadiga, como condições superficiais, corrosão, concentradores de tensões residuais, tensões médias, tipo de carregamento aplicado, sobrecarga, condições do meio ambiente, temperatura, estrutura metalúrgica ou microestrutura do material (MANSUR et al., 2011). Esses e outros fatores combinados ou mesmo isolados podem iniciar o fenômeno de fadiga no material.

3.5.2 Propagação de uma trinca por fadiga

O período de iniciação de uma trinca, denominado de estágio I, é seguido de sua propagação (estágio II). Considera-se que o estágio II se inicia, quando as microtrincas se evoluem a uma camada subsuperficial do material, em que os efeitos de superfície não mais influenciam o crescimento da trinca, passando a depender da resistência do material. Na Figura 3.6, mostra-se o estágio de propagação da trinca por fadiga.

Figura 3.6 – Estágios de propagação de uma trinca por fadiga.



Fonte: Schijve et al. (2004)

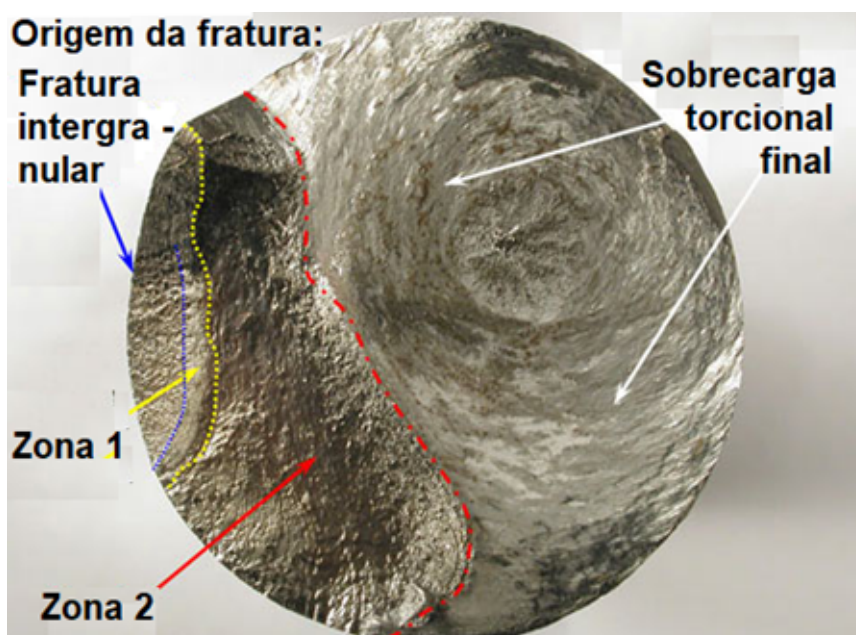
A evolução da microtrinca continua até encontrar um contorno de grão. Esse contorno de grão reduz a propagação da trinca até que seja ultrapassada e volta a acelerar até encontrar um novo contorno de grão, assim vai ocorrendo a trinca (SCHIJVE et al., 2004). Com a evolução da trinca, atinge-se um determinado momento em que o material não resiste ao esforço e ocorre, no último ciclo do carregamento, a falha por fratura de tração, do tipo frágil (clivagem), dúctil ou a combinação das duas.

A peça fraturada por fadiga pode apresentar características úteis na determinação das variáveis do processo de fabricação envolvido, podendo auxiliar na investigação da falha, o que

permite uma análise minuciosa das condições de carregamento da peça ou, até mesmo, aspectos importantes como, de que maneira a geometria da peça pode influenciar o processo de formação de uma trinca. A avaliação da superfície fraturada pode ser realizada de forma microscópica ou macroscópica, que usualmente apresenta alguns elementos:

- **Marcas de praia (beachmarks):** normalmente, são as características mais usuais encontradas nas superfícies de fraturas por fadiga, sendo elementos curvos, cujos centros apontam para o ponto de origem da trinca por fadiga. Podem ser resultantes da mudança de intensidade ou frequência de carregamento ou também causadas pela oxidação da superfície de fratura, durante o período de serviço intermitente da peça. A forma geral de marcas de praia em uma superfície fraturada por fadiga é apresentada na Figura 3.7.

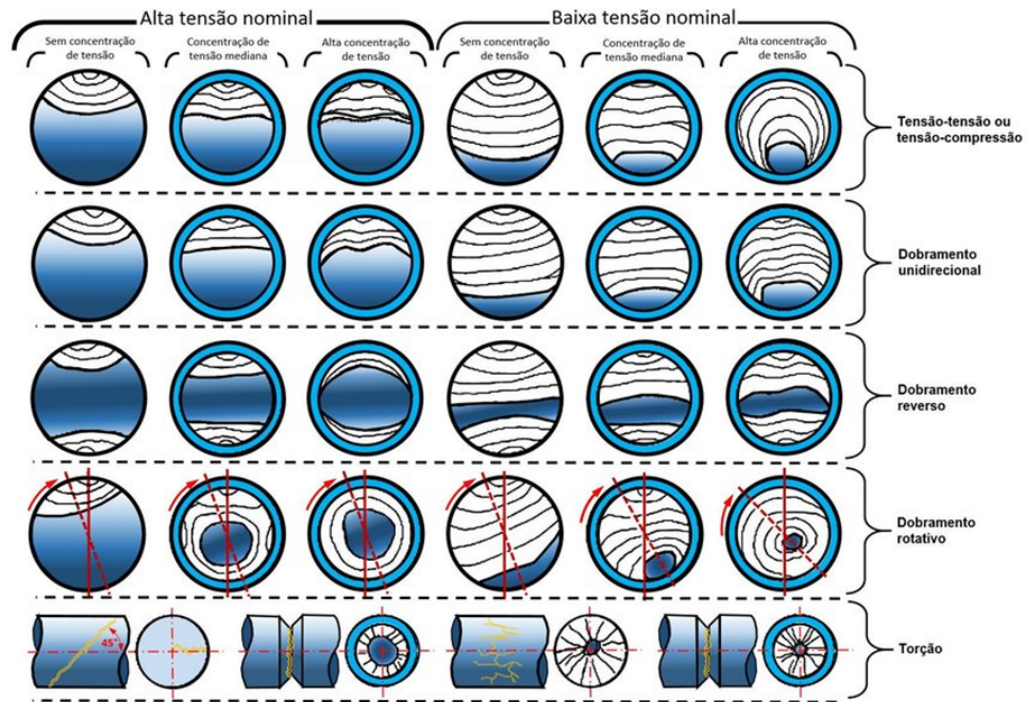
Figura 3.7 – Marcas de praia.



Fonte: ZOLIN (2011)

- **Zona final fraturada:** normalmente, se apresenta com aspecto idêntico à fibra com tamanho relacionado à magnitude do carregamento. Assim, a sua forma depende do formato, tamanho da peça e da direção do carregamento e do tipo e natureza da sollicitação. Os tipos de seções fraturadas são apresentados na Figura 3.8.
- **Marcas de “catraca” (ratchtmarks):** ocorrem quando duas ou mais frentes de trincas originam-se na superfície e se propagam em níveis diferentes e, então, se coalescem formando uma espécie de degraus. Assim, ocorrem também em fraturas com carregamento

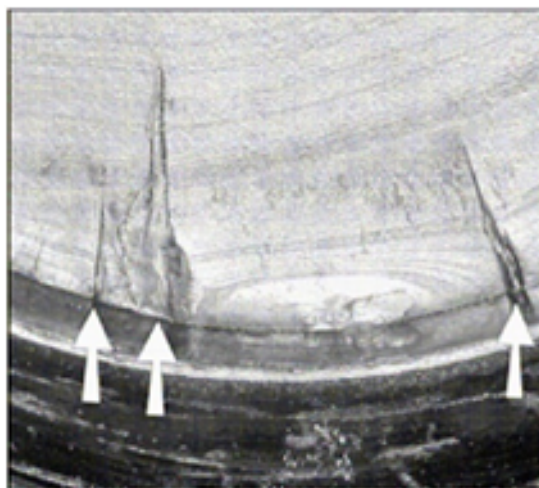
Figura 3.8 – Marcas de praia.



Fonte: ZOLIN (2011)

monotônico, porém em um número bem menor e com menor frequência. A presença de ratchetmarks em uma superfície fraturada é apresentada na Figura 3.9.

Figura 3.9 – Marcas de catraca.

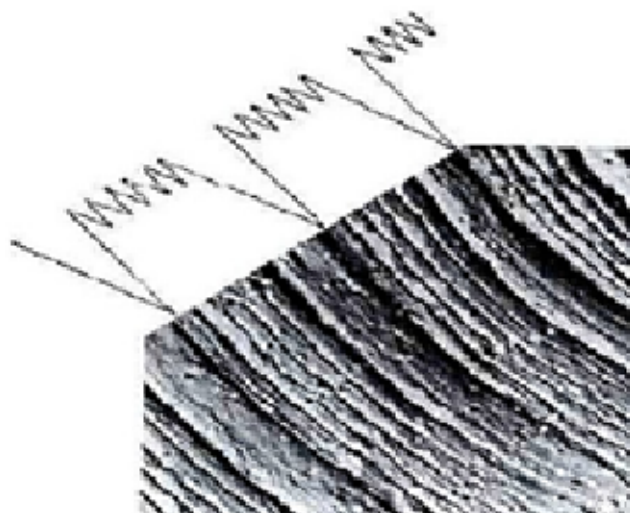


Fonte: ASM International (2002).

- Estrias: são considerados os mais proeminentes indicadores da presença de fadiga no processo de falha de um componente. Alguns pequenos sulcos, formados durante o avanço da trinca por fadiga, são originados pelo processo de abertura e fechamento da

frente da trinca, ou seja, são indicadores diretos da presença de carregamento alternado. Cada estria é resultante de um único ciclo de tensão, mas nem todo ciclo de tensão necessariamente cria uma estria, segundo o ASM International (2002). O espaçamento de uma trinca depende fortemente do nível de carga aplicado. Uma superfície estriada é apresentada, na Figura 3.10.

Figura 3.10 – Estrias.



Fonte:ASM International (2002).

As estrias são mais visíveis em materiais dúcteis e em carregamento com níveis acima do limite de fadiga do material. As estrias podem auxiliar no processo de investigação de falha, pois, uma vez observadas, são indicativos de presença de carregamento cíclico. Podem também prover informações com relação à direção e à taxa de crescimento da trinca.

3.5.3 Mecânica da fratura linear elástica

A mecânica da fratura é, usualmente, confundida com o fenômeno de fadiga. Durante a elaboração de projeto, engenheiros e técnicos devem dar uma importância maior ao fenômeno chamado fadiga. É nesse fenômeno que ocorre a nucleação da trinca, ou seja, levando ao dano. Na elaboração de um projeto, deve-se considerar esse tipo de dano no material.

A mecânica da fratura linear-elástica (MFLE) tem os seus conceitos aplicados no sentido de avaliar a imparcialidade estrutural dos equipamentos em operação nas mais diversas situações de trabalhos que envolvem eventos cíclicos. O que favorece o aparecimento de trincas de fadiga, que são analisadas, conforme norma **AMERICAN SOCIETY OF MECHANICAL**

ENGINEERS (1992). O tempo de vida dos componentes respeita a lei que compara a propagação da trinca, por ciclo de carga, da/dN, e o valor de intensidade de tensão, $(\Delta\sigma) K$ (SIH; PARIS; ERDOGAN, 1962).

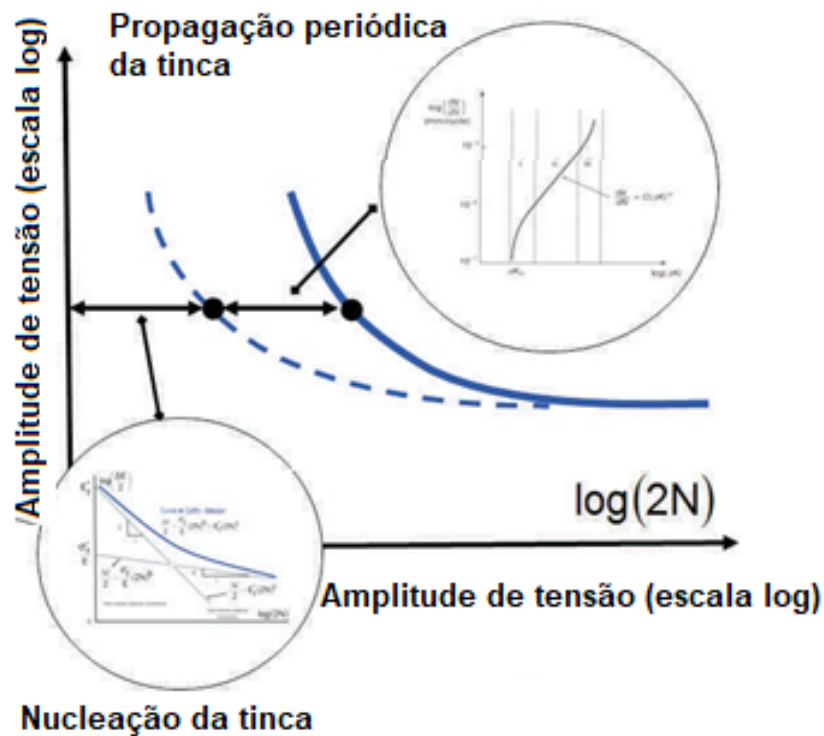
No período da segunda guerra mundial, a incessante necessidade de produzir material bélico, por exemplo, meios de transporte, pouco se preocupou com o comportamento dos materiais. A partir daí, ocorreram graves acidentes envolvendo aeronaves, navios, a indústria mecânica de um modo geral. O conceito da integral J definido por Rice (1968), vem sendo utilizada para aumentar a vida dos equipamentos, baseada na teoria da mecânica da fratura elasto-plástica (MFEP). Profissionais da área metal mecânica, geralmente, dão maior atenção para a fratura ocorrida, ou seja, quando o equipamento falha proposto por Dowling e Begley (1976) fatigue. No estudo do comportamento de pequenas trincas, na região linear de fadiga sobre a curva da $dN - (\Delta\sigma) K$ local da zona onde a fratura linear-elástica não prevê adequadamente o crescimento do defeito (TANAKA; NAKAI, 1983). O mecanismo que controla a vida dos equipamentos que operam em ambiente e ou atmosfera agressiva, conforme citado por Mattar et al. (1995).

É necessário um comprimento do defeito, suficientemente, para evitar que os efeitos da microestrutura afetem a sua propagação. O que depende do tamanho do grão do material. A trinca pequena é aquela que possui um comprimento em torno de 0,1 mm. A formulação elasto-plástica tem-se a sua aplicação geral nos problemas de fadiga, ao contrário de $(\Delta\sigma) K$, com $(\Delta\sigma) J$. Assim pode-se prever a vida desde os primeiros instantes após a iniciação da trinca até o tamanho final compreendido. conforme Ajayi et al. (1995), Dwling e Begley (1976), Porowski et al. (1992) e Suresh e Ritchie (1983).

Para o entendimento do fenômeno fadiga foram desenvolvidos vários critérios de análise para ser levado em consideração, durante a elaboração de projeto. Com isso, evitando maiores acidentes e catástrofes (ANDERSON, 2005).

A curva S-N nos explica bem o fenômeno chamado fadiga (ABRAHÃO et al., 2008). Quando se tem um número baixo de ciclos e o carregamento do equipamento alto, a mecânica da fratura deverá estar presente. Na abordagem do caso, no sentido contrário, quando se tem uma carga baixa com um número de ciclo muito alta, a possibilidade de ocorrer a fratura se torna alta (ALVES, 2015). Na Figura 3.11, mostra-se a curva S-N com a linha pontilhada da propagação da trinca de fadiga.

Figura 3.11 – Curva S-N



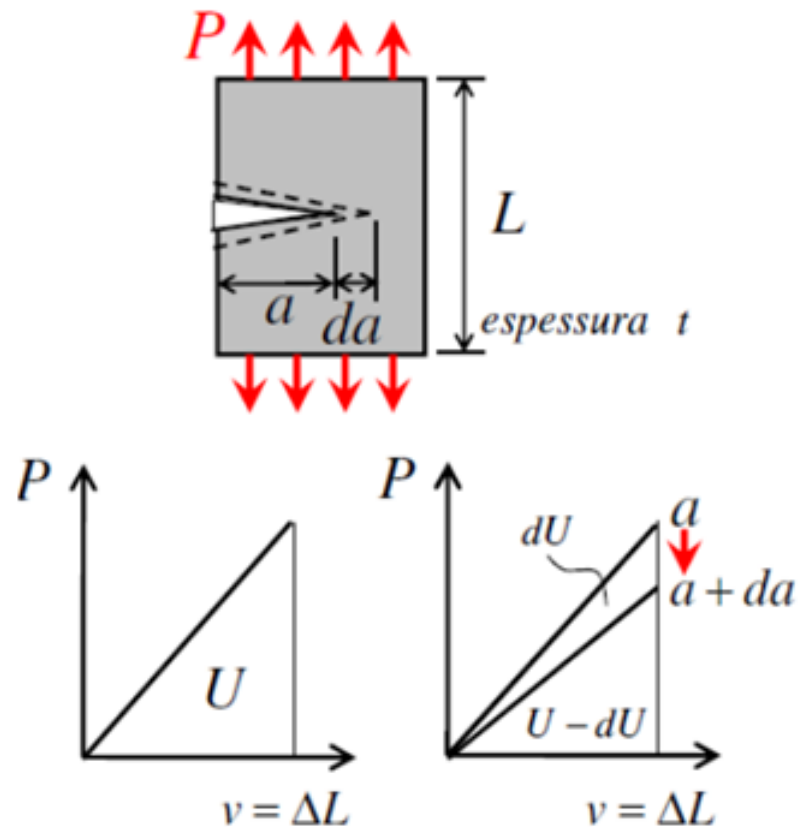
Fonte: abrahao et al.(2008) melhorada do Ansys

Quando um sistema passa de um estado de desequilíbrio, para um estado de equilíbrio, há uma redução líquida de energia. Isso está completamente relacionado com a primeira lei da termodinâmica. “Uma trinca pode se formar ou uma trinca existente pode aumentar, apenas se esse processo implicar em redução ou conservação de energia total, conforme Figura 3.12. Desse modo, as condições críticas para a fratura podem ser definidas o ponto onde o crescimento de trincas ocorre sob condições de equilíbrio, sem variação de energia total, conforme (GRIFFITH, 1921). A taxa de liberação de energia (G), em razão do crescimento de uma trinca, pode ser representada pela Equação 3.7.

$$G = -\frac{1}{t} \frac{dU}{da} \quad (3.7)$$

em que: U é a área total do triângulo, $\frac{mm^2}{2}$, a representa o comprimento inicial da trinca em mm, e da , o crescimento da trinca em mm.

Figura 3.12 – Liberação de energia devido ao crescimento de uma trinca



Fonte: Anderson (2005)

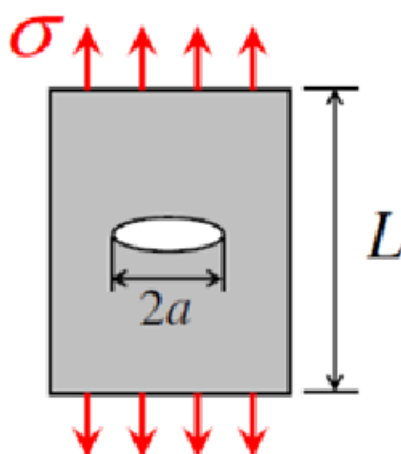
Uma placa plana com uma trinca semielíptica de comprimento $2a$ pode ser descrita por meio da Equação 3.8.

$$G = \frac{\pi\sigma^2 a}{E} \quad (3.8)$$

em que σ é a força aplicada em toda área da chapa e E é o módulo de elasticidade do material da chapa.

A propagação da trinca ocorre, quando G atinge um valor crítico denominado de G_c , caracterizado por uma combinação crítica de sollicitação e da dimensão da trinca. G_c é considerado uma medida de tenacidade à fratura do material, o que pode ser experimental ou analíticas, por considerações de energia necessária para a criação de superfície de fraturas. Uma trinca no centro da chapa com os dados da equação 3.7 está representada na Figura 3.13.

Figura 3.13 – Representação de uma trinca no centro da chapa.



Fonte: Anderson (2005)

Segundo a teoria de Griffith (1921), toda energia liberada é usada na formação de novas superfícies, o que é verdadeiro para materiais frágeis, como exemplo, os cerâmicos. Portanto, G é adequado para materiais frágeis ou com pequenas zonas de plastificação. Nos casos de materiais dúcteis, a maior parte da energia é utilizada para a deformação e formação de zona plástica. O conceito de energia influenciada pelo fator K pode ser definida, por meio da Equação 3.9.

$$K = FS\sqrt{2\pi r} \quad (3.9)$$

O fator K está relacionado com a severidade de uma trinca iniciada em um sistema mecânico, ou produto, o que pode ser comparado com o limite de tenacidade à fratura. Quando se trabalha com um material com limite de resistência elevado, o fator K tende a reduzir. Para determinar o comportamento do fator K , no interior de uma trinca, deve-se usar a integral J , Griffith (1921). Alguns programas comerciais para simulações numéricas já utilizam a integral J (Equação 3.10) para simular o fenômeno de fratura.

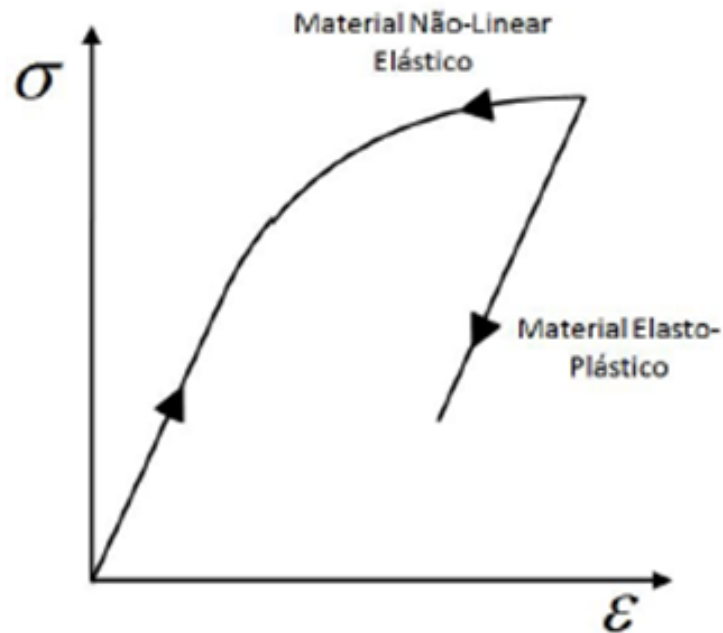
$$J = -\frac{\partial II}{\partial a} \quad (3.10)$$

3.6 O desenvolvimento da integral J

A integral J pode ser entendida como uma taxa de liberação de energia potencial. Ela caracteriza a fratura nos materiais não lineares, idealizando à deformação elasto-plástica, ou

seja, “elástica não linear”. A comparação esquemática do comportamento tensão-deformação de materiais elásticos não lineares e materiais elastoplásticos é apresentada na Figura 3.14.

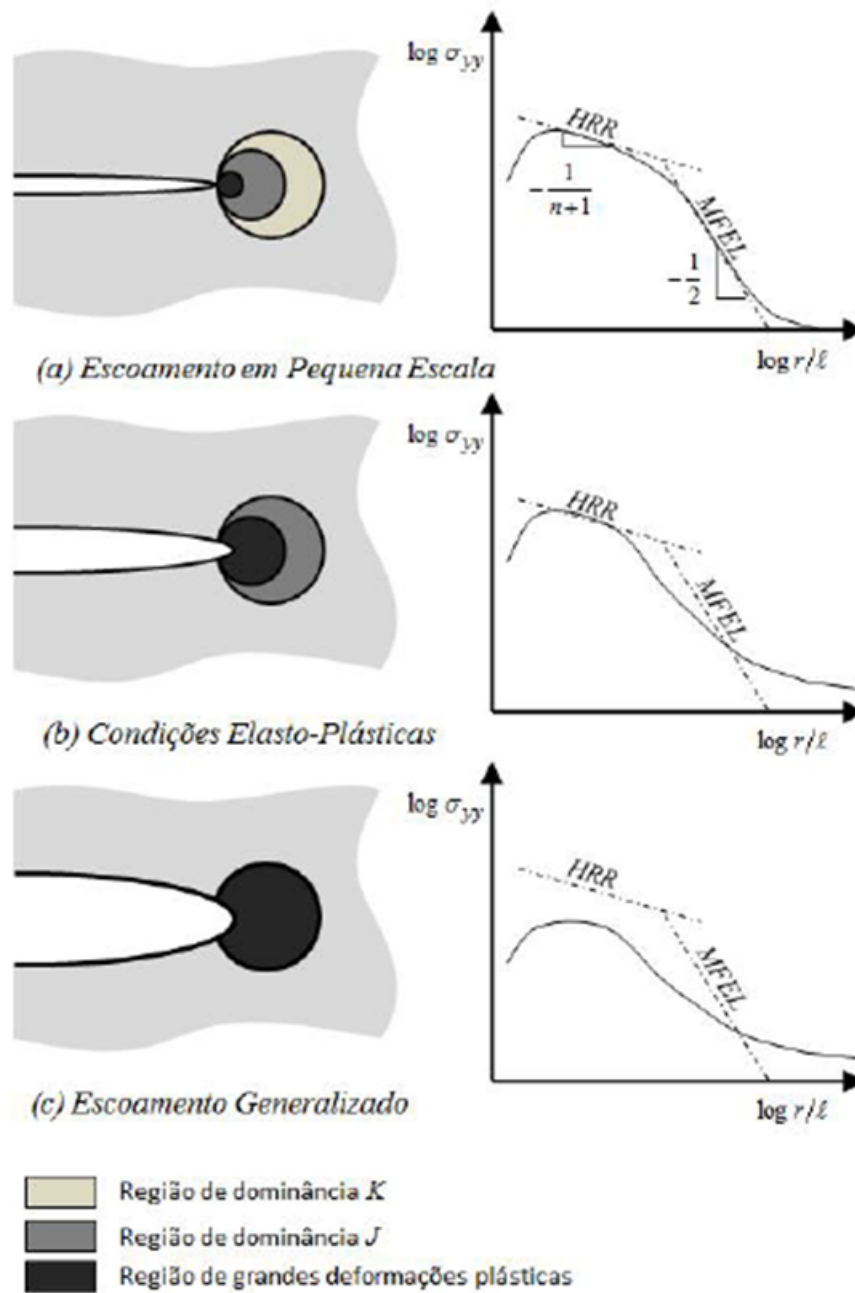
Figura 3.14 – Comparação esquemática do comportamento tensão-deformação de materiais elásticos não lineares e materiais elastoplásticos.



Fonte: Anderson (2005)

O conceito de uma integral independente do caminho, utilizada para avaliar a taxa de liberação de energia, no crescimento da ponta da trinca, foi, originalmente, desenvolvido por Eshelby, Frank e Nabarro (1951), embora, a definição original tenha sido estabelecida por Rice e Rosengren (1968). A Integral J define uma integral de contorno, para resolver a distribuição de forças em individuais imperfeições existentes em materiais elásticos, conforme Figura 3.15.

Figura 3.15 – Efeito da plasticidade sobre o campo de tensão na ponta da trinca.



Fonte: Anderson (2005)

A integral J pode ser, fisicamente, interpretada como a taxa de liberação de energia, potencial perante o sistema e, em relação à variação do comprimento da trinca Smelser e Gurtin (1977). A expressão da taxa de liberação de energia para um caso bi-dimensional elástico pode ser expressa como a Equação 3.11.

$$J = \int_{\Gamma} \left[U dy - T_i \frac{\partial u_i}{\partial x} ds \right] \quad (3.11)$$

onde T_i é o vetor de tração definido pela normal n , u_i é o vetor de deslocamento que age no ponto ds , S é a área delimitada por qualquer caminho s anti-horário fechado, e U é a densidade de energia de deformação armazenada em qualquer ponto de s e é definida por:

$$U = \int_0^{\epsilon_{ij}} \sigma_{ij} d\epsilon_{ij} \quad (3.12)$$

É importante ressaltar que, para materiais com comportamento linear elástico, o parâmetro de fratura elasto-plástica J é idêntico à taxa de liberação de energia potencial G (Equação 3.13).

$$J = G \quad (3.13)$$

3.6.1 Dedução da Integral J

Deve-se considerar como um corpo homogêneo de material elástico linear ou não linear, que seja livre de forças e submetido a um campo de deformação bidimensional (tensão plana, tensão generalizada no plano, tensão anti-plana), de modo que todas as tensões σ_{ij} dependendo apenas de duas coordenadas cartesianas x_1, x_2 representando respectivamente à x e y . Suponha-se que o corpo de análise contenha algum entalhe, com superfícies planas paralelas ao eixo x_n e uma ponta arredondada indicada por um arco Γ . Assim, pode-se considerar que uma rachadura direta constitui um caso limitante. Desse modo, pode-se definir a energia de deformação e densidade U pela Equação 3.14.

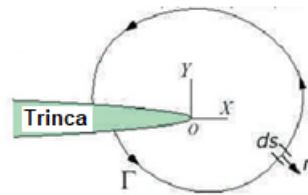
$$U = U(x, y) = U(\epsilon) = \int_0^{\epsilon} \sigma_{ij} d\epsilon_{ij} \quad (3.14)$$

Onde $\epsilon = [\epsilon_{ij}]$ que é o tensor de tensão infinitesimal para cada ponto do sistema. Desse modo, considera-se a integral J definido pela Equação 3.15.

$$J = \int_{\Gamma} (U dy) - T \frac{\partial u}{\partial x} ds \quad (3.15)$$

Na Equação 3.15, tem-se que Γ é uma curva em torno da ponta do entalhe, a integral sendo avaliada no sentido anti-horário a partir da superfície plana inferior do entalhe e continuando, ao longo do caminho de Γ , conforme Figura 3.16, sobre uma superfície plana. Em que T corresponde a tração vetor definido de acordo com o normal externo ao longo Γ , $T_i = \sigma_{ij} n_j$, onde u é o vetor de deslocamento e ds é um elemento do comprimento do arco ao longo de Γ .

Figura 3.16 – Integral J



Fonte: adaptado de Griffith (1921)

Agora, para que seja válida a Equação 3.16, deve-se provar que a integral J possui o mesmo valor, para qualquer que seja o caminho fechado adotado para Γ . Essa independência de caminho, combinada com o fato que J, frequentemente, possa ser avaliada de forma direta, assim, constitui-se, então, a chave para uma variedade de aplicações subsequentes a problemas de concentração de deformação.

Assim, para provar essa hipótese, considerar qualquer curva fechada Γ^* envolvendo uma área A^* em uma deformação bidimensional, campo livre de forças do corpo. Pode-se aplicar o Teorema de Green que relaciona o rotacional de uma integral dupla a uma certa integral de linha, nas coordenadas cartesianas x_1, x_2 obtemos então a Equação 3.16.

$$\int_{\Gamma^*} (UDY - T_i \frac{\partial u_i}{\partial x} ds) = \int_{A^*} \left[\frac{\partial U}{\partial x} - \frac{\partial}{\partial x_j} (\sigma_{ij} \frac{\partial u_i}{\partial x}) \right] dx dy \quad (3.16)$$

Diferenciando a densidade da energia de deformação, tem-se:

$$\frac{\partial U}{\partial x} = \frac{\partial U}{\partial \epsilon_{ij}} \frac{\partial \epsilon_{ij}}{\partial x} = \sigma_{ij} \frac{\partial \epsilon_{ij}}{\partial x} = \frac{1}{2} \sigma_{ij} \left[\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \right] = \sigma_{ij} \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x} \right) \quad (3.17)$$

Desde que $\sigma_{ij} = \sigma_{ji}$ temos então que:

$$\sigma_{ij} \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x} \right) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\sigma_{ij} \frac{\partial u_i}{\partial x} \right) \quad (3.18)$$

Desde que $\frac{\partial \sigma_{ij}}{\partial x_j} = 0$ a área integral aparece identicamente e, portanto, tem-se que:

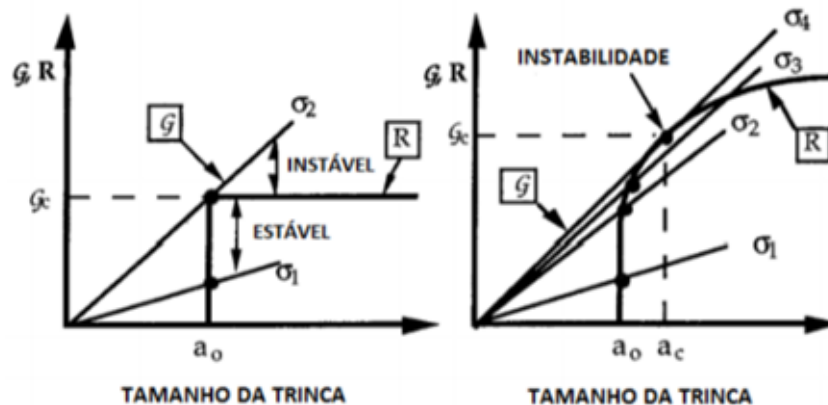
$$\int_{\Gamma^*} (UDY - T_i \frac{\partial u_i}{\partial x} ds) = 0 \quad (3.19)$$

Assim, para qualquer que seja a curva fechada Γ^* tem-se que a integral será sempre igual a zero.

3.6.2 A Integral J aplicada ao software numérico

Os materiais dúcteis, por características próprias exibem, crescimento estável e lento de trinca, acompanhado por considerável deformação plástica, ou seja, existe uma resistência ao crescimento da trinca, durante a extensão da mesma, em razão da dissipação de energia, por deformação plástica, em torno da ponta da trinca. Antes de atingir um crescimento constante, a zona plástica, na ponta da trinca, aumenta, durante a extensão da mesma. Essa extensão da zona plástica requer um aumento das forças externas, para que o crescimento estável da trinca continue e possa ser expresso pela curva JR (Figura 3.17) Onde a_0 e G_c estável e para a_c e G_c de instabilidade .

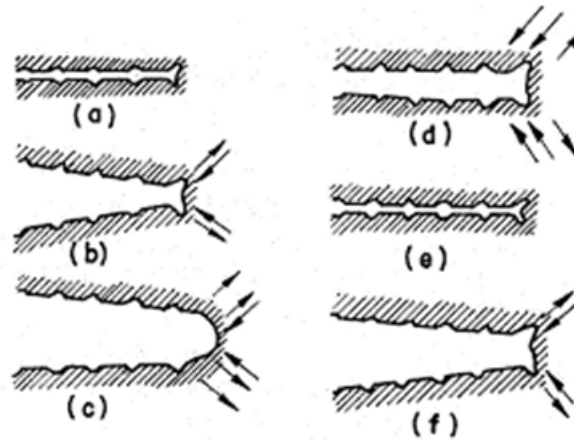
Figura 3.17 – Representação esquemática da curva de resistência de um material. A primeira apresenta um valor constante de R, enquanto a segunda apresenta um comportamento crescente que ocasiona um crescimento estável da trinca antes da fratura.



Fonte: Anderson (2005)

Essa curva expressa a relação entre a propagação estável da trinca (Δa) e a integral J. A resistência à propagação dúctil da trinca em um aço também pode ser caracterizado pelo valor da inclinação dJ/da . Para os metais, as curvas JR são, normalmente, crescentes. A curva JR foi utilizada, inicialmente, para determinar JIC, que é o valor de J para o início da propagação estável da trinca. Mas, utilizar JIC como critério de projeto é extremamente conservativo, dessa maneira, não se considera o aumento da resistência com o crescimento da trinca. Portanto, o valor de J considerado em um projeto deve ser inferior ao de J, para se promover crescimento instável da trinca Anderson (2005). (Figura 3.18) mostra o crescimento da trinca.

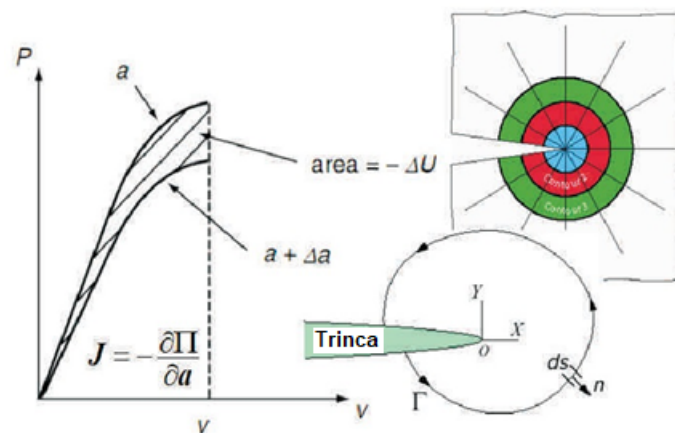
Figura 3.18 – Crescimento estável da trinca antes da fratura.



Fonte: Anderson (2005)

O crescimento de trinca é acompanhado por descarregamento elástico e, portanto, deformação plástica não proporcional, na vizinhança da ponta da trinca. Isso implica em uma aplicação da integral J estritamente em análise de trincas estacionárias. Apesar disso, se carregamentos quase-proporcionais ocorrem em qualquer lugar, exceto na pequena vizinhança da ponta da trinca, então J pode ser utilizado para analisar o crescimento de trinca. Contudo, devem-se fornecer as condições adicionais, para que o crescimento de trinca controlado por J seja satisfeito Anderson (2005). Na Figura 3.19 - Simulação de fratura, utilizando a integral J no software ANSYS.

Figura 3.19 – Simulação de fratura utilizando a integral J no software ANSYS.



Fonte: adaptado de Griffith (1921)

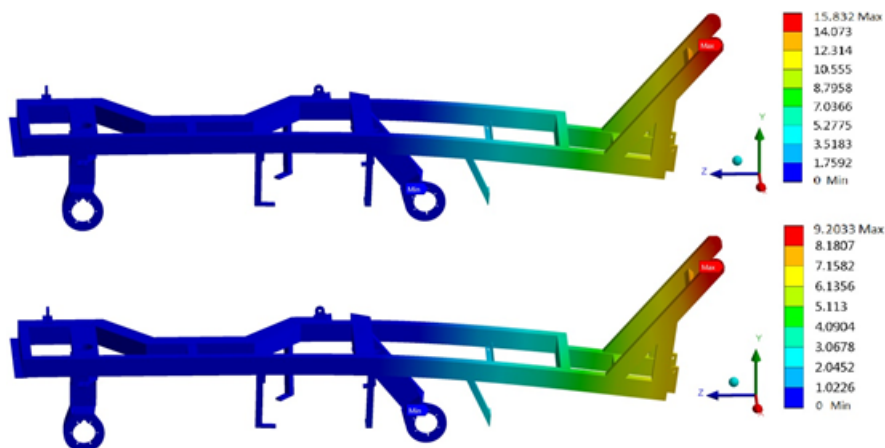
3.7 Análise de vibração pelo método dos elementos finitos

Lotti et al. () apresentaram os benefícios da análise pelo Método dos Elementos Finitos (MEF), que podem contribuir para o desenvolvimento de projetos em diversas áreas, como ortodontia, medicina, mecânica, naval, aeronáutica e civil, por meio da análise de tensões provenientes de vibrações, fadiga, fratura e transferências de calor. O MEF utiliza uma malha, formada por nós e elementos, ao longo de toda a geometria em análise. Alguns programas comerciais, como o SolidWorks, Nastran e ANSYS utilizam o MEF para o desenvolvimento de protótipos virtuais, o que gera custo menor, se comparado com protótipos reais.

O MEF vem sendo utilizado em vários setores da indústria, como exemplo, na indústria metal-mecânica, para a avaliação de produtos siderúrgicos (YUCEL et al., 2012). Na engenharia agrícola, o MEF tem sido usado para avaliar o comportamento de máquinas em campo (MAGALHÃES et al., 2006). Outro exemplo de aplicação do MEF, na engenharia agrícola, pode ser observado em trabalhos, envolvendo colhedoras de café (SILVA; SILVA; MAGALHÃES, 2014; SILVA et al., 2018a; SOUZA; CICOGNA; CHIQUITO, 2007; SANTOS, 2008), as quais trabalham, sobre fortes vibrações.

No caso da colheita mecanizada de café, quando a tomada de potência (TDP) é proveniente de um trator para movimentar os vibradores, que promovem a derriça dos frutos de café, as colhedoras são denominadas de arrasto ou tracionadas. Algumas máquinas possuem o seu próprio motor diesel de tração e são denominadas por colhedoras automotrizes. Esses dois tipos de colhedoras devem ser tratados de maneira diferente, porém em ambos os casos, pode-se utilizar o MEF para prever seu comportamento, durante a colheita, conforme realizado por Silva et al. (2018). Figura 3.19.

Figura 3.20 – Simulação da estrutura de uma colhedora de café automatizada



Fonte: Silva et al. (2018).

O MEF também tem outras aplicações na engenharia agrícola, ele foi utilizado para avaliar tensões em equipamentos de moagem de cana-de-açúcar. O software comercial utilizado foi o Cosmoswork, apresentando resultados significativos, como o de redução de massa de 3 kg na estrutura do equipamento, referente a 15% de sua massa. Outra aplicação do MEF, na engenharia agrícola, foi reportada em experimentos de uma semeadora-adubadora de quatro linhas utilizadas no plantio direto de soja, feijão e milho, em propriedades de pequeno porte, tracionada por tratores de baixa potência, conforme (TEIXEIRA et al., 2009). Nesse caso, a estrutura resistiu à massa do adubo, das sementes, da própria estrutura e aos esforços máximos de cada sugador, em que foram encontrados valores de tensão da ordem 227 MPa.

Para estimar a vibração de colhedoras de café e outras máquinas, é usual a utilização do MEF. A partir de informações de geometria e de materiais, pode-se determinar um modelo de análise (modelo de vibração e frequência natural), na estrutura da colhedora, como em (SILVA et al., 2018b). A vibração da máquina colhedora busca atingir a derriça de ressonância e contato direto. Dessa forma, vai ocorrendo a queda dos frutos de café e realizando a colheita do café mecanizada Silva et al. (2018).

4 METODOLOGIA

4.1 Descrição do problema

O desenvolvimento do trabalho iniciou-se, após ter ocorrido uma fratura, no cilindro de varetas de uma colhedora de café tracionada por trator. Essa colhedora trabalhou por um período de 8 horas por dia, durante 26 dias, no período de 8 meses, equivale, aproximadamente, a 1664 horas de trabalho. Para um período de 8 horas por dia durante 26 dias, no período de 12 meses, equivale, aproximadamente, a 2496 horas de trabalho, em uma lavoura do sul de Minas Gerais, nas proximidades da cidade de Elói Mendes.

A empresa fabricante da máquina cedeu o componente fraturado para estudo na UFLA, buscando uma investigação diante da fratura ocorrida na base do cilindro de varetas, e que se estendeu na forma espiral.

4.1.1 Colhedora de café

A colhedora utilizada, nesse trabalho em estudo, foi fabricada pela indústria metal mecânica. É uma colhedora tracionada por um trator, modelo JFenix. Esse modelo possui um só cilindro de varetas de vibração, o qual atua na linha de plantio, em apenas um lado da planta e promove a colheita, por meio de vibrações. Essas vibrações vêm do sistema mecânico localizado na parte inferior da colhedora. A falha ocorreu em condições normais de trabalho, com frequência de vibrações de 12,5 Hz; 14,2Hz; 15,8Hz; e o freio com a solicitação mais severa, com 12 kg de massa. Na (Figura 4.1), mostra-se a colhedora de café.

Figura 4.1 – Colhedora de Café.

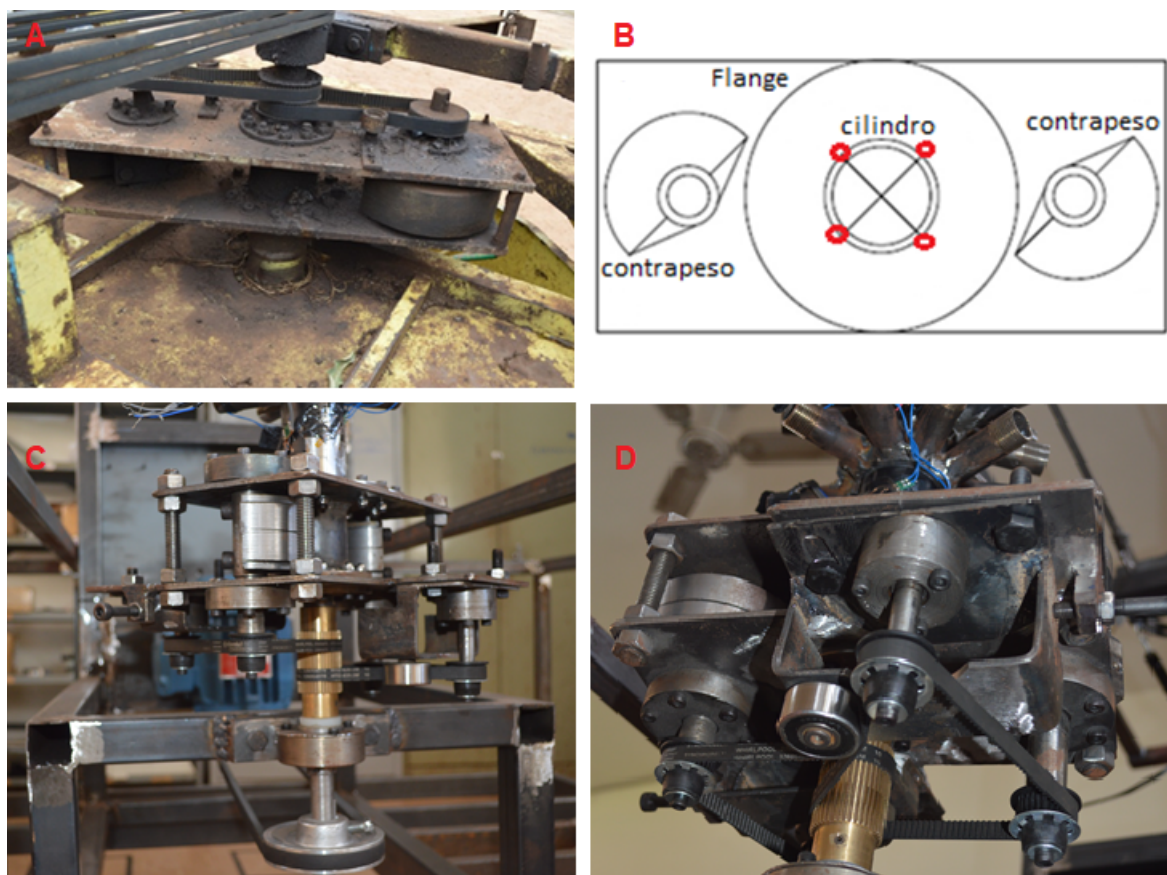


Fonte: Do autor (2019).

4.1.2 Sistema mecânico

O sistema mecânico está acoplado ao eixo do cilindro de varetas (Figura 4.2). Esse sistema mecânico é fabricado, a partir de duas chapas (superior e inferior) de aço SAE 1020, as quais têm dimensões de 750 mm de comprimento, 400 mm de largura e 15 mm de espessura. Na figura, mostram-se os dois sistemas mecânicos, A e B é o da colhedora que utiliza dois cilindro de varetas, o sistema mecânico fica na parte de cima da colhedora, e o C e D é o do protótipo que fica na parte de baixo. Idêntico ao da colhedora de um cilindro estudada.

Figura 4.2 – Sistema mecânico das duas colhedoras de Café.



Fonte: Do autor (2019).

Cada chapa é furada no centro com um diâmetro de 260 mm para o flange maior, e a segunda, com diâmetro de 160 mm para o flange menor, com a finalidade de promover a fixação do sistema mecânico no cilindro de varetas por meio de 20 parafusos de 15 mm de diâmetro cada. Equidistante a esses dois furos centrais, há quatro outros furos de diâmetros de 55 mm, que servem para fixar os eixos dos dois contrapesos de 25 kg cada. Nas quatro extremidades das duas chapas, são fixados 4 parafusos espaçadores, com 200 mm de comprimento e 30 mm de diâmetro, cada um. Esses quatro parafusos, também chamados de haste, trabalham com quatro porcas em cada haste, para promover o afastamento das duas chapas e mantê-las fixas.

Nota-se que as duas chapas são montadas de tal forma que, entre elas, ficam alojados dois contrapesos, um em cada eixo motriz. Esses dois eixos são ligados ao eixo do cilindro vibrador, por meio de duas correias dentadas.

O conjunto eixo do cilindro vibrador é um sistema mecânico composto por dois rolamentos e um eixo central que recebe as duas correias dentadas dos eixos dos contrapesos. O mancal desse eixo é soldado em um flange. Esse flange é ligado ao tubo vibrador pelo seu

flange de menor diâmetro (160 mm), por meio de 10 parafusos de 15 mm de diâmetro cada. A função desse eixo é girar, constantemente, durante o período de trabalho da colhedora. Outra função importante desse eixo é a de deixar o cilindro de varetas livre, podendo se movimentar tanto para a direita quanto para a esquerda. Esse eixo louco recebe transmissão de uma caixa multiplicadora 3 para 1.

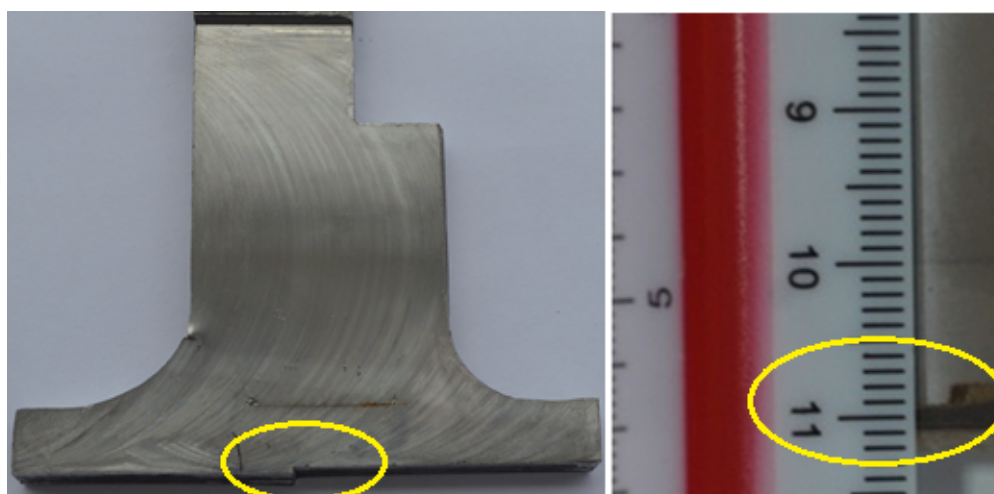
A tomada de potência do trator transmite movimento, por meio de um eixo cardan, para a caixa multiplicadora e ao sistema mecânico. O sistema mecânico recebe a rotação do trator, por meio do eixo motriz e todo o sistema mecânico vibra. Esse fenômeno de vibração é transmitido para o cilindro de varetas. O funcionamento desse sistema promove a colheita dos frutos de café. É importante que os dois contrapesos mantenham o sincronismo de funcionamento do sistema. Caso os contrapesos percam o sincronismo, a vibração do cilindro fica fora de controle, podendo danificar a máquina.

4.1.3 O tubo do cilindro vibrador de varetas

O tubo do cilindro vibrador, com diâmetro externo de 130 mm e parede de 10 mm, foi usinado, na parede interna, do lado que se destina a base da peça. Nessa região da base, a espessura da parede do tubo ficou menor.

Uma vista interna é apresentada na Figura 4.3 (A), em que fica evidente o detalhe da usinagem, evidenciando o quanto avançou a usinagem do cilindro de varetas na parte interna,

Figura 4.3 – Usinagem realizada na parede interna do cilindro de varetas vibrador



Fonte: Do autor (2019).

A profundidade de corte foi de 0,75 mm, deixando o diâmetro interno do tubo 1,5 mm maior até o centro em que foi soldado o flange maior. O tubo também recebeu um flange de

diâmetro menor de 260 mm e espessura de 20 mm. O flange maior possui diâmetro de 360 mm e espessura de 35 mm.

Os flanges foram furados em todo o seu contorno, com 10 furos em cada. Os furos têm diâmetro de 15 mm. Esses furos são usados para parafusar o sistema de vibração com os contrapesos no tubo. No flange maior, foi executado um rebaixo de 19,5 mm e diâmetro de 260 mm na parte inferior. Antes de ser soldado, o flange foi chanfrado na parte inferior e na parte superior de 10 mm.

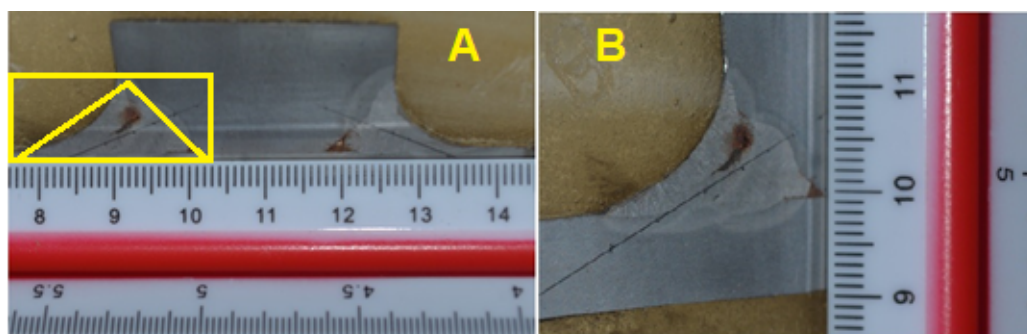
Há informação, por parte do fornecedor, de que esse flange foi soldado pelo processo de Soldagem Gás Metal a Arco, que vem do inglês (GMAW) ou Metal Ativo Gás (MAG). Essa solda preencheu o chanfro e obteve um reforço de mesmo volume depositado no chanfro. Em todo o contorno do tubo, foram soldados 16 tubos de 20 mm de diâmetro externo com 12 mm interno e com comprimento de 60 mm. Isso se repetiu equidistante de 50 mm em toda extensão do tubo.

Um disco com um furo no meio, de 50 mm de diâmetro recebeu um eixo maciço que foi soldado dos dois lados. Na extremidade do tubo, outro disco idêntico foi soldado em todo o contorno do tubo e do eixo maciço. Esse eixo recebeu o tambor de freio que tem o diâmetro de 400 mm e 100 mm de espessura. Depois que o tubo passou por esse processo de fabricação, ele passa a se chamar cilindro vibrador.

Nota-se, na Figura 4.4 (B), a posição do flange que sustenta o sistema de vibração do cilindro vibrador de varetas, onde foi realizada a usinagem no interior do cilindro de varetas até nas proximidades do centro do flange, deixando a espessura da parede menor, com apenas 8,5 mm.

Notou-se ainda que foi confeccionado um chanfro de 10 mm, nos dois lados do flange. Esses chanfros foram soldados pelo processo MAG e gás de proteção C25, com 25% de CO₂ e 75% de ar, em todo o contorno, por meio de dois passes de solda. Observou-se também que a área da solda foi de, aproximadamente, 100 mm^2 , o que pode ter contribuído para o elevado aporte térmico na peça. Na Figura 4.4 (A), apresenta-se a área de solda dentro de um triângulo inscrito no retângulo e a Figura 4.4 (B) apresenta as medidas horizontal e vertical, da seção transversal da solda do flange.

Figura 4.4 – Corte longitudinal para identificar a área da seção transversal da solda do cilindro de varetas com a flange (B) posição horizontal e (B) vertical



Fonte: Do autor (2019).

4.1.4 Cilindro vibrador

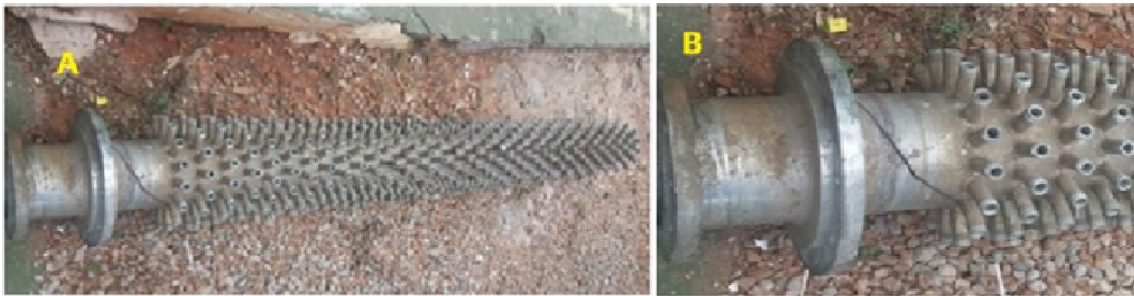
O cilindro de varetas, com 2,40 m de comprimento para executar sua função, que é a de promover a colheita dos frutos de café por meio de vibração. Conforme (FERREIRA et al., 2016), normalmente, utiliza uma faixa de regulagem do tambor do freio da máquina para imprimir uma força de desprendimento entre 8, 10 e 12 kgf, cujos torques equivalem a 42,89, 53,61 e 64,33 N.m, respectivamente. A frequência de vibração do cilindro vibrador ficou na faixa de 750; 850 e 950 ciclos min⁻¹ o que equivale em 12,5; 14,2 e 15,8 HZ, respectivamente; Sales (2011) na condição de maturação dos frutos de café verde até cereja e para frutos de café do tipo Catuaí vermelho. Com Valores abaixo dessa faixa não é possível efetuar a colheita e valores, acima dessa faixa, podem danificar os pés de café.

O local da fratura está exatamente, entre o tubo com a solda de sustentação do flange. É o flange que trabalha como suporte de sustentação, para o sistema de vibração da colhedora de café.

4.2 Diagnóstico da falha

A fratura ocorrida no cilindro iniciou-se na ZTA da solda de união do flange com o tubo. Conforme a Figura 4.5, apresenta-se a fratura em ângulo de, aproximadamente, 45°.

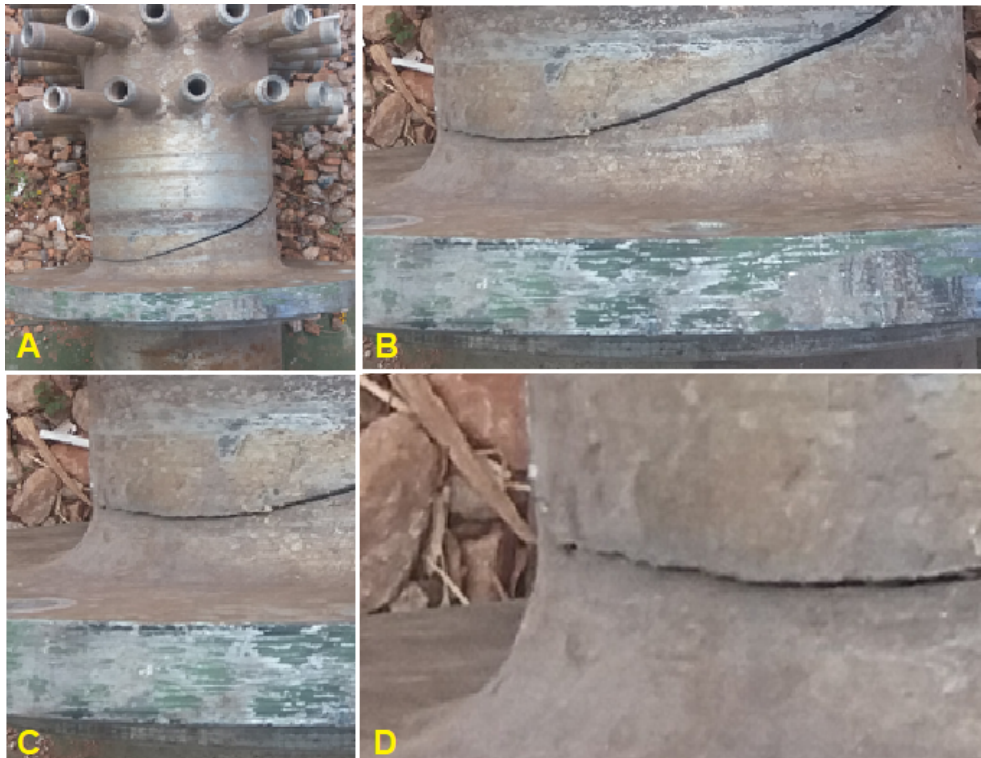
Figura 4.5 – (A) Comprimento total do cilindro e B) Cilindro fraturado em ângulo de aproximadamente 45°



Fonte: Do autor (2017).

Nesse local, se encontram evidências de um elevado aporte térmico, durante a execução do processo de soldagem. Outro fator que pode contribuir, é a massa elevada do componente flange com a baixa massa em relação à espessura da parede do tubo. Isso propiciou o aparecimento de mordedura entre o tubo com a solda, conforme Figura 4.6.

Figura 4.6 – Trinca na ZTA, com presença de mordedura



Fonte: Do autor (2019).

4.2.1 Análise laboratorial

As análises de laboratório foram importantes para avaliar as condições em que o cilindro de varetas se encontrava. Para isso, foram realizados ensaios de tração, análise química, metalografia, ensaios de dureza e ensaio por microscópio eletrônico de varredura (MEV).

4.2.2 Retiradas dos Corpos de Provas (CPs)

Recebeu-se do fabricante o cilindro vibrador com a fratura. O cilindro de varetas e o flange foram mapeados e, em seguida, retirados dois corpos de provas (CPs) do tubo, sendo um para análise de fratura e outro para dureza Brinell, dois para análises químicas (um do tubo e outro do flange), três do material do tubo, para ensaios de tração (CP1, CP2 e CP3), três do material do tubo, para ensaios metalográficos (CP1, CP2 e CP3), três da região soldada para dureza Vickers (CP1, CP2 e CP3), os quais foram também direcionados para análise por microscópio eletrônico de varredura (MEV), conforme Figura 4.7.

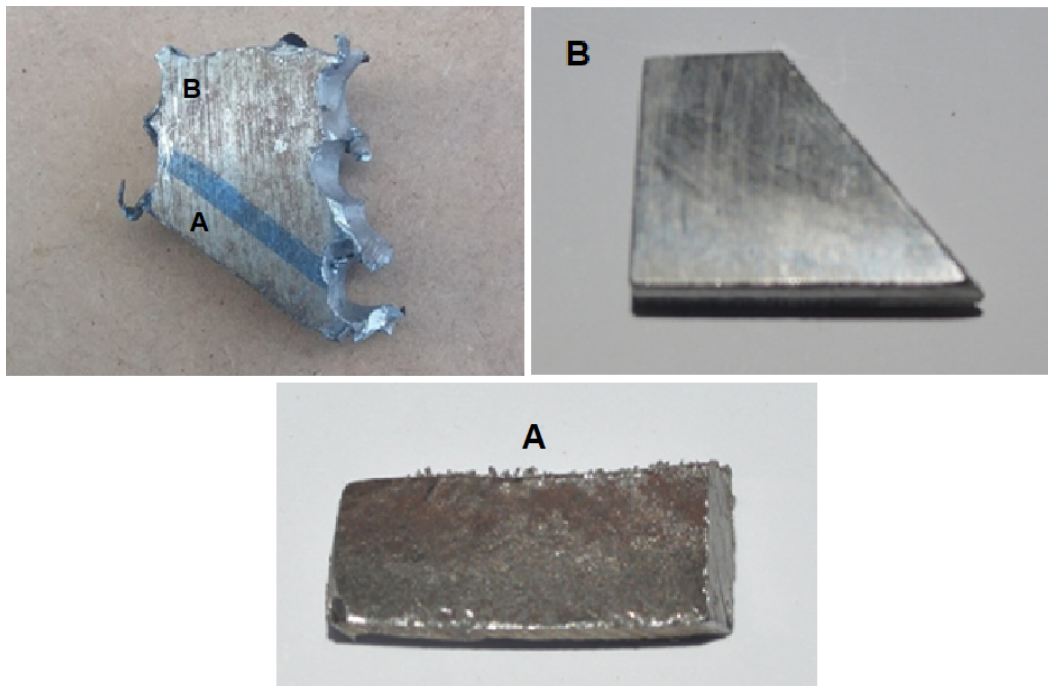
Figura 4.7 – A) Marcação próxima à trinca para retirada dos CPs, B) cilindro após retirada dos corpos de provas (1- próximo à trinca para análise química, 2- na região soldada para ensaio metalográfico e 3 - entre a flange e o cilindro de varetas para ensaio de tração).



Fonte: Do autor (2017).

Com referência na Figura 4.11 o CP1 foi dividido em dois CPs, nesse corpo de prova, a face da trinca foi cortada por uma serra manual, separando em dois CPs. A face da fratura CPA foi submetida ao ensaio com o microscópio eletrônico de varredura (MEV) em duas grandes regiões. Com a finalidade de verificar a presença de marcas de praias em função do tipo de fratura. A região do cilindro de varetas retirada para análise no MEV é apresentada na Figura 4.8, a 4.11.

Figura 4.8 – CP A Trinca para o MEV e o CP B para análise química e dureza Brinell.



Fonte: Do autor (2017).

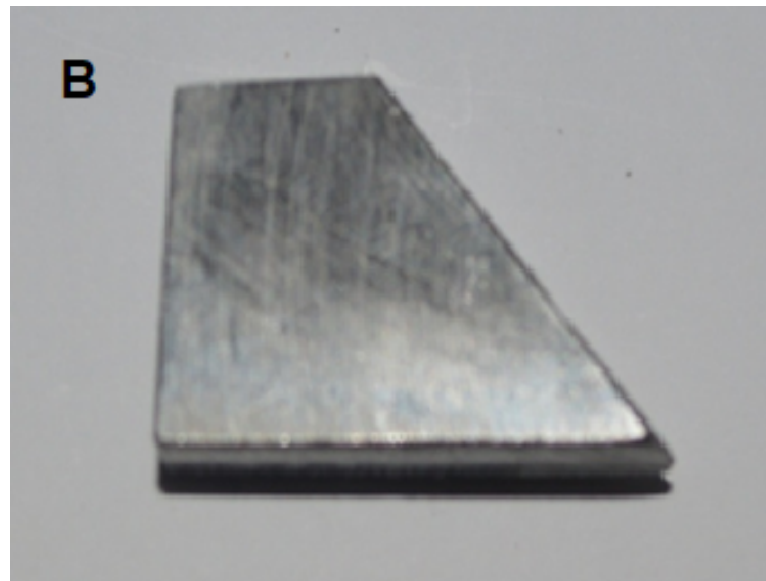
Figura 4.9 – Região do cilindro de varetas vibrador fraturada para análise MEV.



Fonte: Do autor (2017).

A segunda parte do CP foi submetida a dois ensaios, sendo eles; Ensaio de dureza Brinell e logo, em seguida, ele foi para o Ensaio de Análise Química do material do tubo.

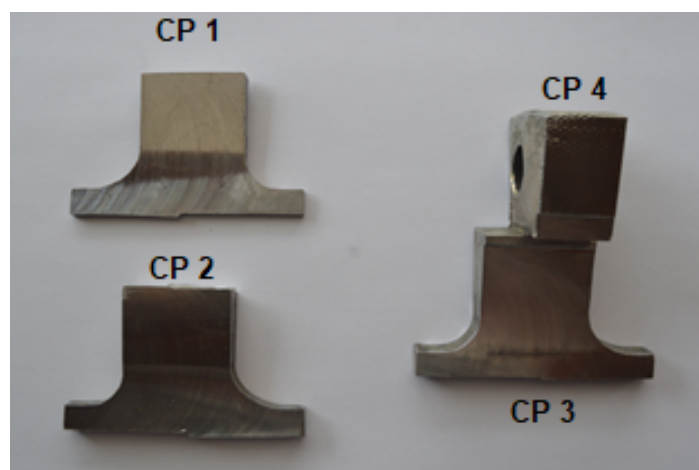
Figura 4.10 – CP B preparado para análise química



Fonte: Do autor (2017).

O CP2 foi dividido em três CPs, dando origem aos corpos de prova denominados por CP1, CP2 e CP3. Esses três CPs foram submetidos ao ensaio de metalografia nital 10% para a revelação das soldas. Os mesmos CPs foram submetidos à análise por microscópio eletrônico de varredura (MEV). Em seguida, os mesmos CPs, foram submetidos ao ensaio de dureza Vickers na região transversal a zona fundida das soldas.

Figura 4.11 – CP4 para análise química do flange



Fonte: Do autor (2017).

Uma parte do CP2 foi cortada, por meio de serra manual e preparado para a análise química do material do flange. Na Figura 4.11, o CP4 ainda junto com o CP3.

Outros 3 CPs, foram retirados para ensaios de tração, por meio de um maçarico. Como o maçarico trabalha com uma temperatura elevada, na faixa de 3100 °C, alguns cuidados foram tomados, principalmente, respeitando-se a propagação da temperatura, imposta pelo processo de oxicorte. O que aumenta a dureza, nas proximidades do corte, em decorrência do aporte térmico, sendo que o resfriamento dos CPs ocorreram ao ar.

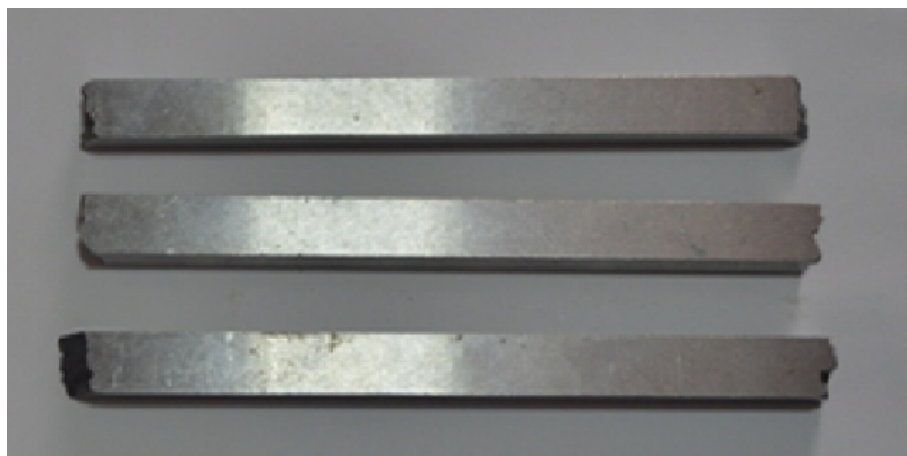
Os CPs3 retirados, para ensaios de tração, estão apresentados, na Figura 4.12. Já os CPs preparados para o ensaio de tração estão apresentados, na Figura 4.13. Observa-se que foram deixados mais de 6 mm de sobremetal nos CPs, tanto no comprimento quanto na largura, para usinagem final dos mesmos.

Figura 4.12 – CPs para ensaio de tração com sobre-metal.



Fonte: Do autor (2017).

Figura 4.13 – CPs preparados para os ensaios de tração.



Fonte: Do autor (2017).

Finalmente, os CPs para os ensaios de tração foram usinados, conforme norma ASTM A370 (AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS, 2014). Os CPs foram marcados e identificados antes da realização do ensaio de tração, conforme Figura 4.14.

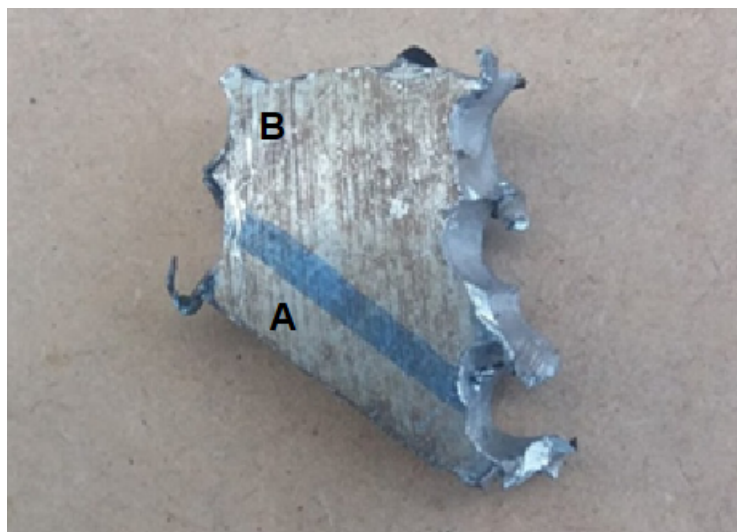
Figura 4.14 – CPs preparados para o ensaio de tração.



Fonte: Do autor (2017).

Além disso, foi preparado um corpo de prova para a análise química, retirado próximo à região fraturada, conforme apresentado na Figura 4.15.

Figura 4.15 – CP A para o MEV Tinca e o CP B para análise química.



Fonte: Do autor (2017).

Todos os relatórios, contendo informações detalhadas das análises laboratoriais, encontram-se no Apêndice A.

4.3 Projeto e prototipagem de uma colhedora em escala reduzida

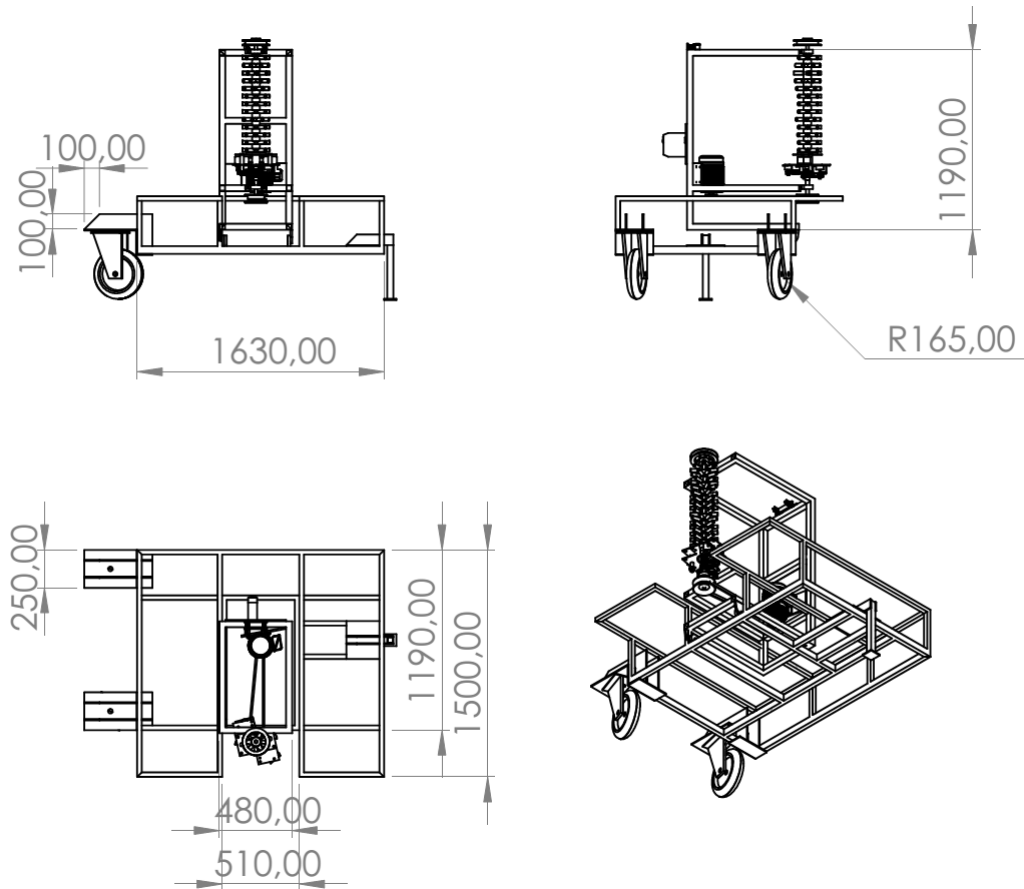
Com base na colhedora real, foi desenvolvido um projeto em escala reduzida (1:3), para tanto, coletaram-se todas as dimensões de uma máquina real, visto que a colhedora de café não possui projeto detalhado disponível para o cliente final, tão pouco a empresa fabricante. Assim, para coletar todas as dimensões necessárias para a construção do protótipo, foram utilizados vários instrumentos de medição, dentre eles: paquímetro, goniômetro e trena. As dimensões principais do equipamento em escala estão descritas na Tabela 4.1. Desse modo, foi possível desenvolver o projeto do protótipo apresentado na Figura 4.16.

Tabela 4.1 – Descrição da colhedora de café

| colhedora de café em escala 1:3 | |
|---------------------------------------|---------|
| altura máxima | 1650 mm |
| largura | 1190 mm |
| comprimento | 1630 mm |
| Diâmetro das rodas | 330 mm |
| comprimento assento | 420 mm |
| diâmetro roda | 610 mm |
| peso | — kg |
| Tubo estrutural principal | |
| Largura | 30 mm |
| Largura | 50 mm |
| Espessura | 3 mm |
| Tubo estrutural suporte eixo vibrador | |
| Largura | 40 mm |
| Largura | 40 mm |
| Espessura | 3 mm |

Fonte: Do autor (2019)

Figura 4.16 – Projeto em escala 1:3 da colhedora de café.



Fonte: Do autor (2019).

A análise experimental foi realizada no protótipo da colhedora de café, representada na Figura 4.17. A justificativa para se trabalhar com o protótipo em escala reduzida foi decorrente das dificuldades da realização das medições em campo, visto que a instrumentação da colhedora poderia prejudicar a colheita.

Figura 4.17 – Protótipo em escala.



Fonte: Do autor (2019).

4.4 Sistema de aquisição de dados para leituras de deformação

Neste trabalho, foi utilizado um sistema de aquisição de dados de fabricação da empresa National Instruments, com módulo NI 9237 e NI 9949. O software utilizado para comunicação com os hardwares foi o Lab View versão 16.0f2. A configuração dos hardwares e do software foi realizada para um quarto de ponte de Wheatstone, conforme indicação do manual do fabricante.

Em uma única placa de fenolite, foram desenvolvidas três pontes de Wheatstone (Figura 4.19), que serviram para alimentar extensômetros unidirecionais em 5 Volts. Também foram adquiridos 100 metros de cabo blindado Af AWG 2x18 com 2 vias para ser ligados entre a placa de aquisição e a ponte de Wheatstone e, em seguida, ligada aos extensômetros, para evitar ruídos externos. Foram usados os extensômetros unidirecionais com especificações PA06-060BA-350-L, 3 mm de grid, 350 ohms. O cálculo das deformações e tensões unidirecionais pode ser realizado, por meio das Equações 4.1, 4.2, 4.3, 4.4 e 4.5

$$\sigma = E \cdot \varepsilon \quad (4.1)$$

Onde:

σ = tensão

E = Módulo de elasticidade do material

ε = deformação específica do material

$$\frac{M}{I} = \frac{\sigma}{Y} \quad (4.2)$$

M = Momento fletor

I = Momento polar de inércia

Y = posição da linha neutra

$$M = F.L \quad (4.3)$$

F = força aplicada

L = Distância entre a posição de aplicação da força e o extensômetro

$$I = \frac{b.h^3}{12} \quad (4.4)$$

b = base da seção transversal da viga

h = altura da seção transversal da viga

$$Y = \frac{h}{2} \quad (4.5)$$

Combinando-se as Equações 4.4 e 4.5 em 4.2, tem-se a Equação 4.6:

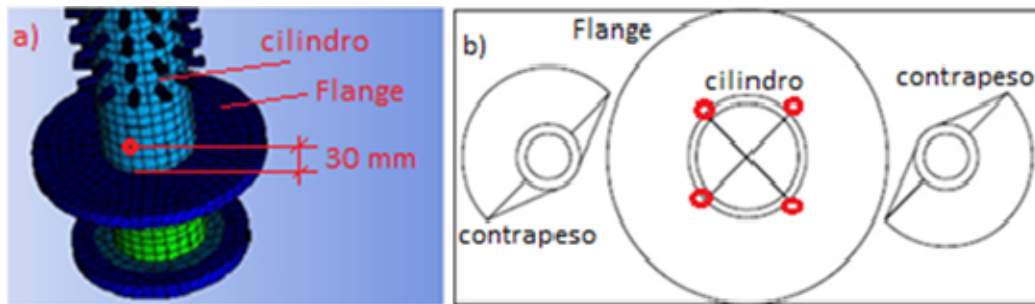
$$\sigma = \frac{6M}{b * h^2} \quad (4.6)$$

Combinando-se as Equações 4.3 e 4.1 em 4.6, têm-se a Equação 4.7.

$$\varepsilon = \frac{6.F.L}{E.b.h^2} \quad (4.7)$$

Para a coleta de dados de deformação, foram utilizados dois extensômetros unidirecionais, no cilindro de varetas, sendo um na vertical e outro na horizontal, ambos distantes de 30 mm da região soldada entre cilindro e flange maior. O local determinado para a colagem do extensômetro foi definido em função da posição de início da trinca, ocorrida no material em estudo (o cilindro fraturado). Foram identificadas quatro posições ideais para a colagem dos extensômetros, no cilindro, equidistantes em ângulos de 90°, conforme 4.18(b). Essas posições coincidem com os vértices formados pela chapa do sistema de vibração com o tubo vibrador. Porém, foi utilizado somente um dos pontos, em que foi realizado o processo de colagem do extensômetro, na posição horizontal, conforme Figura 4.18(a).

Figura 4.18 – As quatro posições críticas para a colagem do extensômetro no cilindro.



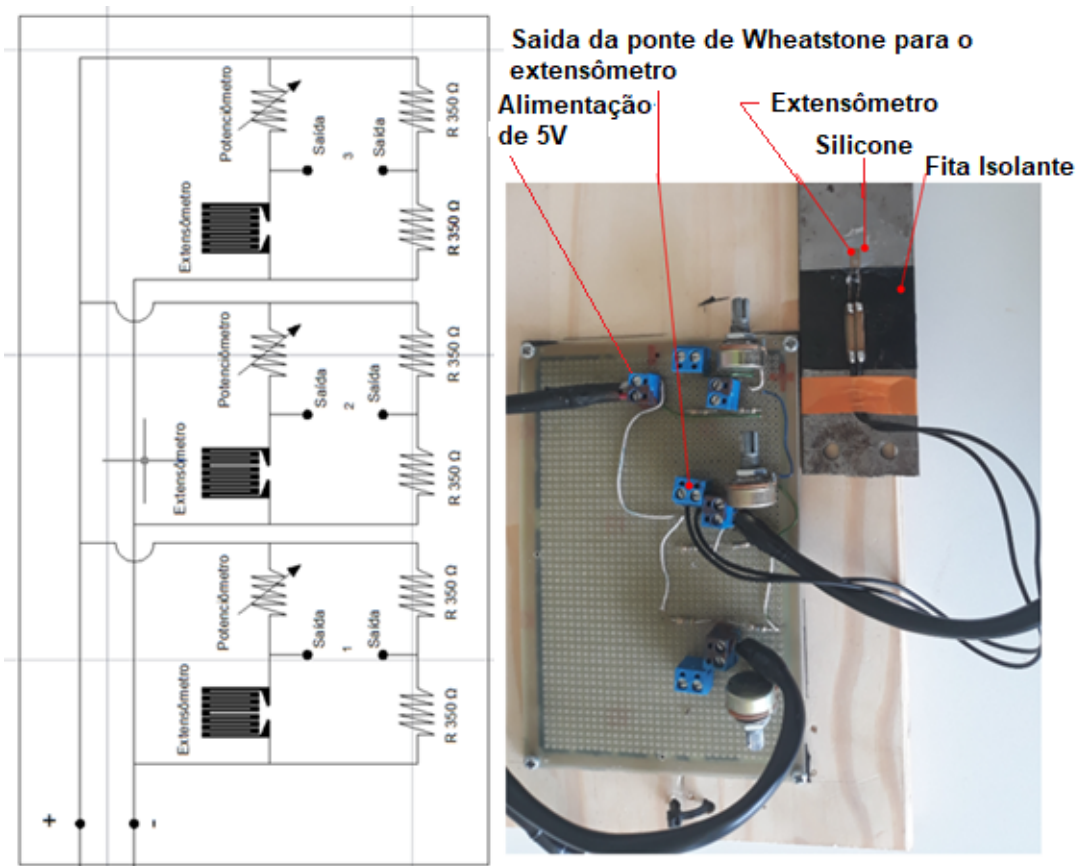
Posição do extensômetro

Fonte: Do autor (2017).

4.4.1 Desenvolvimento da ponte de Wheatstone para os extensômetros

Para realizar as leituras de deformações, foi confeccionada uma placa eletrônica contendo três pontes de Wheatstone, para alimentar três extensômetros de uma só vez. A ponte de Wheatstone foi ligada com dois resistores e um potenciômetro de 350 ohms, que serviu para realizar o equilíbrio da ponte de Wheatstone. O circuito eletrônico utilizado para a ponte de Wheatstone e os extensômetros está apresentado, na Figura 4.19.

Figura 4.19 – Ponte de Wheatstone.



Fonte: Do autor (2017).

O circuito, contendo as três pontes de Wheatstone e o extensômetros utilizou ligações a partir de cabos com especificação Af 2 x 18 AWG 2 x 0,75 mm, blindado com malha de cobre. A ponte de Wheatstone foi alimentada com 5 Volts fornecidos pela placa de aquisição de dados. A alimentação do sistema em 5 Volts foi realizada pela placa de aquisição de dados da National Instrument.

4.4.2 Preparação do sistema para calibração dos extensômetros

A calibração do sistema foi realizada, por meio de um dispositivo de ensaio. Esse dispositivo envolveu a utilização, de um extensômetro unidirecional, colado em uma chapa de aço SAE 1020 e de seção transversal 190 mm x 40 mm e 3,25 mm de espessura. O extensômetro, foi colado no centro da chapa, em relação à largura e à distância, e de 1/3 em relação à posição de engaste da chapa, a partir da preparação da superfície, por meio de lixamento com três tipos de granulometria, 100, 320 e 600. Além disso, foram utilizados, álcool absoluto e gazes para realizar a limpeza do local antes da colagem dos extensômetros.

Foi aplicada uma fita adesiva de 50 mm de largura nos extensômetros do lado superior. Alinhou-se o extensômetro, na marcação prévia da chapa de aço e, após aplicação de adesivo instantâneo, foi realizada a colagem do extensômetro, na chapa, mantendo-se uma pressão com o dedo polegar de um minuto para a cura da cola.

Em seguida, foi retirada a fita adesiva do extensômetro, certificando-se do perfeito alinhamento com a marcação prévia na chapa. Foi utilizada uma fita isolante nas proximidades do extensômetro, para evitar curto circuito nos filamentos. Após essa etapa, foi realizada a medição da resistência elétrica dos extensômetros com um multímetro da marca Fluke 115 True RMS, para certificar o valor de 350 ohms. A medida foi realizada com sucesso, permitindo-se a aplicação de silicone sobre o extensômetro para proteção.

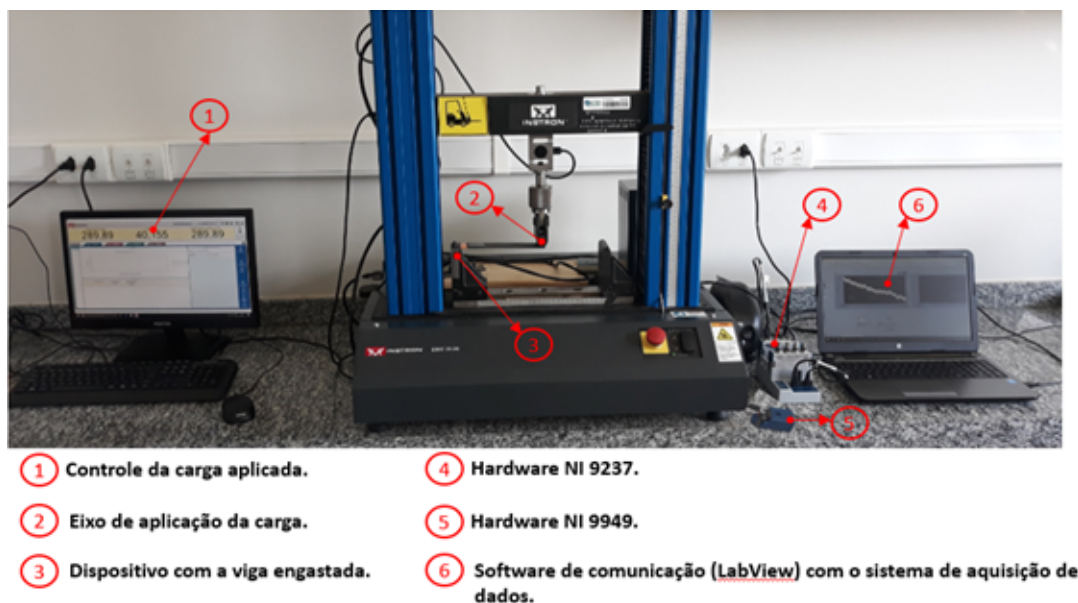
A partir daí, aguardou-se 12 horas para realizar a cura do silicone e executar as etapas seguintes. A próxima etapa foi a soldagem dos cabos blindados nos filamentos dos extensômetros, em que foi utilizada uma solda branca. Essa etapa foi realizada com o auxílio de um ferro de solda de 127 volts. Os cabos blindados foram soldados ao sistema de aquisição de dados, ponte de Wheatstone, placa de aquisição de dados e realizada a comunicação, por meio de um computador notebook da marca Dell Core i7.

4.4.3 O processo de calibração dos extensômetros

Para o processo de calibração do sistema, foi utilizada uma máquina universal de ensaios Instron EMIC 23-20, no laboratório de Mecânica. Realizou-se o carregamento da chapa, a partir de um cutelo sobre a extremidade livre da chapa, por meio de sete valores de carga (10 a 70 N com um incremento de 10 N), conforme Figura 4.20. A calibração foi realizada, a partir da coleta dos valores de deformação específica, por meio da leitura de deformação do extensômetro para cada carga aplicada, comparando-se com valores analíticos (Equação 4.7).

Foram realizadas cinco réplicas do experimento, de modo que, cada réplica consistiu na leitura média de deformação específica para cada carga aplicada. Como estratégia para minimizar o erro, durante a coleta de dados, a cada medição realizada, optou-se por realizar o mesmo procedimento de calibração do extensômetro disponível no software LabView. A descrição completa do procedimento de calibração dos extensômetros, bem como os resultados de deformação, encontram-se no Apêndice C.

Figura 4.20 – Calibração.



Fonte: Do autor (2017).

4.5 Sistema de aquisição de dados para leituras de aceleração e deformação

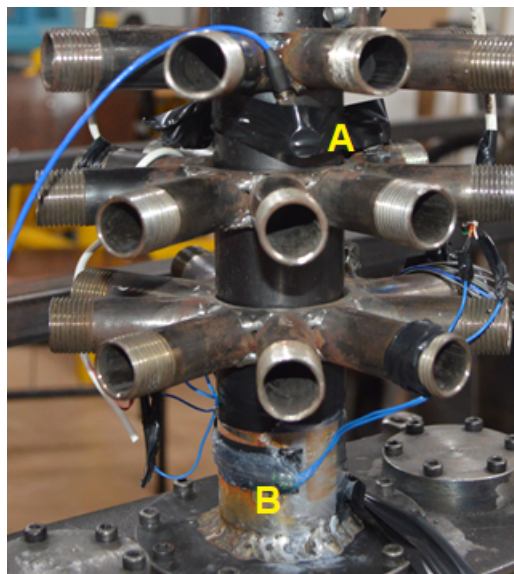
Para realizar a leitura de vibração do cilindro da colhedora protótipo, foi utilizado um acelerômetro modelo 352C33, número de série LW211814, com sensibilidade de 99,5 mV/g. O acelerômetro foi colado e revestido com uma fita isolante para garantir a confiabilidade das leituras. Os resultados foram processados no software LabView e transferidos para o software MS Excel. Os resultados das leituras de aceleração encontram-se no Apêndice B.

Antes de se realizar a colagem dos extensômetros no protótipo, foi realizado o mesmo procedimento de preparação da área, na chapa de calibração, com uso de lixas de granulometria de 100, 320 e 600. O protótipo da colhedora de café foi construído no laboratório do CEFET - Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais- Nepomuceno e instrumentada no laboratório da Engenharia de Controle e Automação da UFLA. A grande diferença da colhedora de produção em relação ao protótipo está no mecanismo que aciona o sistema mecânico. Na colhedora de produção, encontra-se um multiplicador de velocidade, enquanto que, no protótipo o sistema mecânico é acionado por um motor elétrico de 0 1 CV. O controle da colhedora de produção está no torque do trator e no protótipo, utilizou-se um inversor de frequência. Esse inversor de frequência possibilitou a regulagem das três frequências de trabalho da colhedora em campo (12,5 Hz, 14,2 Hz e 15,8 Hz). Desse modo, 20 Hz no inversor de frequência foi equivalente a 12,5 Hz no protótipo da colhedora, 23 Hz no inversor de frequência foi equivalente

a 14,2 Hz, no protótipo da colhedora e 25 Hz, no inversor de frequência, foi equivalente a 15,8 Hz no protótipo da colhedora.

Após calibração e ajustes de todo o sistema de aquisição, foi realizada a coleta dos dados de aceleração e deformações do cilindro vibrador de varetas no protótipo da colhedora. Foram realizados testes 1x1x2x3, ou seja, uma regulagem de freio (12 kgf), uma posição de acelerômetro (entre a base das varetas, conforme Figura 4.21), duas posições de extensômetros na base do cilindro (vertical e horizontal) e três frequências de vibração, conforme Ferreira Júnior et al. (2015),

Figura 4.21 – Coleta de dados com acelerômetro e extensômetro.



A - Acelerômetro
B - Extensômetro

Fonte: Do autor (2019).

5 CONCLUSÕES

A partir dos resultados encontrados em análise química dos materiais do ensaio de tração, MEV, dureza e metalografia da solda, conclui-se que:

Por meio das análises químicas realizadas nos materiais do conjunto tubo flange pode-se afirmar que o material se trata de um aço de baixo teor de carbono, em que o tubo ficou em 0,36% e flange 0,40%, após ser submetido e analisado, por meio da equação de carbono equivalente, ficando no limite da soldabilidade do material, índice que chama a atenção para alguns cuidados no processo de soldagem.

A dureza Brinell serviu para confirmar o material constituinte do tubo e o baixo teor de carbono. Já ensaio de tração apresentou o limite de resistência, escoamento e alongamento do material, informando as características mecânicas do mesmo, sendo comparado com a literatura Silva e Bracarense (2003), que apresentaram resultados, praticamente, equivalentes, exceto o alongamento que, na literatura, foi de 14% e o encontrado ficou em torno de 40,5%. Para soldagem, realizou-se revelação ácido nítrico 10%, obtendo uma grande área de zona térmica afetada e passes de solda não uniformes, entre dois e três passes, além disso, apresentou regiões de descontinuidade, falta de fusão, trincas e porosidade. O teste de dureza Vickers demonstrou, para um mesmo ponto contido em peças diferentes denominado linha, que não há um comportamento uniforme, mas em pontos da mesma peça o comportamento é mais homogêneo, o que pode indicar defeito do material do tubo, abaixo da impressão da dureza, constituindo uma região de encruamento e elevação de dureza localizado.

Após diagnóstico de falha, baseado nos resultados dos testes físicos, simulações numéricas e análise do processo de fabricação da peça, que revelaram defeitos internos no material do tubo, combinados com as vibrações cíclicas, conclui-se que a fratura pode ter ocorrido por fadiga. A trinca iniciou-se na região soldada entre o flange maior e o cilindro vibrador de varetas.

Levando-se em consideração os fatores que influenciam no processo de soldagem, da conformação mecânica do tubo, pode-se evitar o surgimento de defeitos no produto final. Utilizando-se a metodologia de soldagem e fabricação apresentada, por meio de uma EPS (Especificação do Processo de Soldagem), utilizando pré-aquecimento na faixa de 130 °C, limpeza antes da realização da soldagem, monitoramento entre passes, com a temperatura entre 100 a 120 °C. Em seguida, com pós-aquecimento na faixa de 200 a 300 °C, seguido de um resfriamento controlado em forno ou coberto com manta térmica de refratário. O que tende a reduzir a probabilidade de

trincas na região de solda. Essas ações tendem a melhorar o processo de soldagem do cilindro vibrador de varetas. E não comprometer a vida útil da colhedora, o que foi comprovado, por meio de simulações numéricas realizadas via Método dos Elementos Finitos.

Defeitos provenientes do processo de fabricação do tubo, aporte térmico imposto pelo processo de soldagem, (corrente de soldagem alta), mordeduras e concentradores de tensões do processo de usinagem (cantos vivos) são considerados fatores que podem acelerar a fratura prematura do cilindro vibrador e, conseqüentemente, a vida útil do equipamento.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABRAHÃO, R. R. R. et al. Fadiga de materiais: uma revisão bibliográfica. **ANAIS DO SEMINÁRIO DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA ENCONTRO INTERNO**, Universidade Federal de Uberlândia, v. 8, p. 1–10, 2008.
- AJAYI, O. et al. Subcritical crack growth: Fatigue, creep and stress corrosion cracking. **Trends in Applied Sciences Research**, orgz, v. 4, n. 1, p. pp–1017, 1995.
- ALBUQUERQUE, S. F. et al. Evaluation of microstructure and mechanical properties of weld metals obtained by manual and automated welding process used in the welding of api 5l x80 steel. **Soldagem & Inspeção**, SciELO Brasil, São Paulo, v. 16, n. 4, p. 322–332, 2011.
- ALMEIDA, S. F.; ABRAHÃO, R. F.; TERESO, M. J. A. Avaliação da exposição ocupacional à vibração de corpo inteiro em máquinas de colheita florestal. **CERNE**, Universidade Federal de Lavras, Lavras, v. 21, n. 1, 2015.
- ALVES, A. L. R. F. **DETERMINAÇÃO DA VIDA INFINITA EM FADIGA DO AÇO ESTRUTURAL DIN 34CrNiMo6**. Tese (Doutorado) — Pontifícia Universidade Católica, Rio de Janeiro, 2015.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM A36: standard specification for carbon structural steel**. West Conshohocken, 1999.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM A370: standard test methods and definitions for mechanical testing of steel products**. West Conshohocken, 2014.
- AMERICAN SOCIETY OF MECHANICAL ENGINEERS. **ASME boiler and pressure vessel code: section II, materials: part C-specifications for welding rods, electrodes, and filler metals**. New York, 1992.
- ANDERSON, T. L. **Fracture mechanics: fundamentals and applications**. [S.l.]: CRC press, 2005.
- ARIAS, A. R.; BRACARENSE, A. Q. Velocidade de propagação de trinca por fadiga de soldas subaquáticas molhadas: avaliação fora da água. **Soldagem & Inspeção**, SciELO Brasil, São Paulo, v. 20, n. 4, p. 403–411, 2015.
- AYERS, R.; WESTCOT, D. Fao–organização das nações unidas para a agricultura e alimentação—a qualidade da água na agricultura. **Campina Grande–PB: UFPB**, 1999.
- BRITO, M. d.; BRITO, V. Gestão estratégica de recursos humanos. **Lavras. UFLA/FAEPE**, Lavras, 2000.
- CALLISTER, W. D. J. Ciência e engenharia de materiais: Uma introdução, 5ª edição. **Rio de Janeiro: LTC**, 2002.
- CAMINAGA, C.; BUTTON, S. T. Mechanical properties of ausforged 27mnsivs6 microalloyed steel. **Rem: Revista Escola de Minas**, SciELO Brasil, Ouro Preto, v. 66, n. 3, p. 331–338, 2013.
- CHIAVERINI, V. Tecnologia mecânica: Materiais de construção mecânica. **Vol. III. 2ª Ed. São Paulo: Editora Makron Books**, 1986.

- COE, F. The avoidance of hydrogen cracking in welding. **Doc. IIW-II-A-308-72**, 1973.
- COLPAERT, H.; COSTA, A. L. V. da et al. **Metalografia dos produtos siderúrgicos comuns**. São Paulo: Editora Blucher, 2008.
- COSTA, C. da; MATHIAS, M. H. Instrumento de análise e diagnóstico em máquinas rotativas de indução. *Sinergia*, São Paulo, v. 12, n. 2, p. 181–189, 2011.
- DOWLING, N.; BEGLEY, J. Fatigue crack growth during gross plasticity and the j-integral. In: **Mechanics of crack growth**. West Conshohocken: ASTM International, 1976. p. 82–103.
- D'IPPOLITO, R. et al. Improving the fatigue life of a vehicle knuckle with a reliability-based design optimization approach. **Journal of Statistical Planning and Inference**, Elsevier, Amsterdam, v. 139, n. 5, p. 1619–1632, 2009.
- ESHELBY, J.; FRANK, F.; NABARRO, F. Xli. the equilibrium of linear arrays of dislocations. **The London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science**, Taylor & Francis, London, v. 42, n. 327, p. 351–364, 1951.
- EXCEL SENSORES. **Extensômetros coláveis de resistência elétrica**. 2019. Disponível em: <<https://excelsensor.com.br/extensometros-colaveis-de-resistencia-eletrica/modelos/unidirecionais-estreitos/>>.
- FERREIRA, L. d. G. J. et al. Recomendação para colheita mecânica do café baseado no comportamento de vibração das hastas derriçadoras. *SciELO Brasil*, Santa Maria, 2016.
- GORNI, A. A.; MEI, P. R. Aços alternativos ao hy-80 sem a necessidade de aplicação de têmpera e revenido. **Rem: Revista Escola de Minas**, *SciELO Brasil*, Ouro Preto, v. 56, n. 4, p. 287–293, 2003.
- GRIFFITH, A. A. The phenomena of rupture and flow in solids. **Philosophical transactions of the royal society of london. Series A, containing papers of a mathematical or physical character**, The royal society London, London, v. 221, n. 582-593, p. 163–198, 1921.
- JOSEPH, B. Fourier. **Theorie analytique de la chaleur**, Paris, 1822.
- JOVANOVIC, M.; GRUM, J.; URAN, M. Influence of lack-of-fusion defects on load capacity of mag welded joints. In: **17th World Conference on Nondestructive Testing, Shanghai-China**. [S.l.: s.n.], 2008. p. 25–28.
- KUEMMLEE, H.; GROSS, T.; KOLERUS, J. Machine vibrations and diagnostics the world of iso. In: IEEE. **Industry Applications Society 60th Annual Petroleum and Chemical Industry Conference**. New York, 2013. p. 1–13.
- LOTTI, R. S. et al. Aplicabilidade científica do método dos elementos finitos. **Revista Dental Press de ortodontia e ortopedia facial**, Maringá.
- MAGALHÃES, A. C. et al. Modelagem de máquina pneumática recolhedora de frutos de café em terreiro usando análise por elementos finitos. **Engenharia Agrícola**, Associação Brasileira de Engenharia Agrícola (SBEA), p. 483–492, 2006.
- MANSUR, T. R. et al. Study of residual stress in welds of dissimilar material and determination of fatigue strength limits of base metals. **Soldagem & Inspeção**, *SciELO Brasil*, v. 16, n. 3, p. 274–284, 2011.

MARQUES, P. V.; MODENESI, P. J. Some handy equations for welding. **Soldagem & Inspeção**, SciELO Brasil, v. 19, n. 1, p. 91–101, 2014.

MATTAR, M. N. et al. Fracture mechanics and fatigue evaluation of nuclear reactor components. Rio de Janeiro, p. 178–190, 1995.

MESQUITA, A. L. et al. Detecção de falhas em rolamentos usando transformadas tempo-frequência–comparação com análise de envelope. **Mecânica Computacional**, Rio de Janeiro, v. 21, p. 1938–1954, 2002.

MILAN, M.; FERNANDES, R. A. T. Qualidade das operações de preparo de solo por controle estatístico de processo. **Scientia Agrícola**, SciELO Brasil, v. 59, n. 2, p. 261–266, 2002.

POKHODNYA, I.; SHVACHKO, V. Cold cracks in welded joints of structural steels. **Materials Science**, Springer, v. 32, n. 1, p. 45–55, 1996.

POROWSKI, J. et al. New mechanical and thermal processes for mitigating stress-corrosion and corrosion-accelerated fatigue. **International Journal of Pressure Vessels and Piping**, Elsevier, v. 50, n. 1-3, p. 63–79, 1992.

RICE, J.; ROSENGREN, G. F. Plane strain deformation near a crack tip in a power-law hardening material. **Journal of the Mechanics and Physics of Solids**, Elsevier, v. 16, n. 1, p. 1–12, 1968.

RICE, J. R. A path independent integral and the approximate analysis of strain concentration by notches and cracks. **Journal of applied mechanics**, American Society of Mechanical Engineers, v. 35, n. 2, p. 379–386, 1968.

SALES, R. S. Avaliação da regulação do freio dos vibradores de colhedoras na eficiência de derriça do café. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) Universidade Federal de Lavras, Lavras, p. 52, 2011.

SANTOS, F. L. **Simulação e avaliação do comportamento dinâmico de frutos do cafeeiro na derriça**. 136 p. Tese (Doutorado), 2008.

SANTOS, P. F. dos F. et al. Avaliação dos níveis de vibração vertical no assento de um trator agrícola de pneus utilizando um sistema de aquisição automática de dados. **Revista Árvore**, Universidade Federal de Viçosa, v. 27, n. 6, p. 887–895, 2003.

SCHIJVE, J. et al. Fatigue crack growth in the aluminium alloy d16 under constant and variable amplitude loading. **International Journal of Fatigue**, Elsevier, New York, v. 26, n. 1, p. 1–15, 2004.

SIH, G. C.; PARIS, P.; ERDOGAN, F. Crack-tip, stress-intensity factors for plane extension and plate bending problems. **Journal of Applied Mechanics**, American Society of Mechanical Engineers, New York, v. 29, n. 2, p. 306–312, 1962.

SILVA, C. A.; BRACARENSE, A. Q. Procedimento de soldagem para preparação de equipamentos de aço carbono exposto a grande quantidade de hidrogênio. **Soldagem & Inspeção**, São Paulo, v. 4, p. 179–186, 2003.

SILVA, E. P. d. et al. Structural static and modal frequency simulations in a coffee harvester's chassis. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, SciELO Brasil, v. 22, n. 7, p. 511–515, 2018.

SILVA, E. P. d. et al. Structural static and modal frequency simulations in a coffee harvester's chassis. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, SciELO Brasil, Campinas Grande, v. 22, n. 7, p. 511–515, 2018.

SILVA, E. P. da; SILVA, F. M. da; MAGALHÃES, R. R. Application of finite elements method for structural analysis in a coffee harvester. **Engineering**, Scientific Research Publishing, London, v. 6, n. 03, p. 138, 2014.

SMELSER, R. E.; GURTIN, M. E. On the j-integral for bi-material bodies. **International Journal of Fracture**, Springer, v. 13, n. 3, p. 382–384, 1977.

SOFFNER, R.; BALASTREIRE, L. Manutenção preditiva em sistemas mecanizados agrícolas. **Engenharia Rural**, Piracicaba, v. 5, n. 1, p. 66–72.

SOUZA, M. G. D.; CICOGNA, T. R.; CHIQUITO, A. J. Excitação dos modos normais de um sistema usando um motor desbalanceado. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, Porto Alegre, v. 29, n. 1, p. 5–10, 2007.

SURESH, S.; RITCHIE, R. Near-threshold fatigue crack propagation: a perspective on the role of crack closure. **AN INTERNATIONAL SYMPOSIUM**, Philadelphia, 1983. Disponível em: <<https://escholarship.org/uc/item/8mr83283>>.

TANAKA, K.; NAKAI, Y. Propagation and non-propagation of short fatigue cracks at a sharp notch. **Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures**, Wiley Online Library, London, v. 6, n. 4, p. 315–327, 1983.

TEIXEIRA, S. S. et al. Caracterização da produção agroecológica do sul do rio grande do sul e sua relação com a mecanização agrícola. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 29, n. 1, p. 162–171, 2009.

WANZELER, C. d. V. et al. Uso da manutenção preditiva para análise de técnicas e detecção de falhas nos hidrogeradores da uhe de tucuruí. 2013.

YUCCEL, M. T. et al. Influence of the supporting die structures on the fracture strength of all-ceramic materials. **Clinical oral investigations**, Springer, London, v. 16, n. 4, p. 1105–1110, 2012.

ZOLIN, I. Ensaios mecânicos e análise de falhas. In: UFSM. Santa Maria, 2011.

SEGUNDA PARTE - ARTIGO 1

**ARTIGO 1 - ANÁLISE EXPERIMENTAL EM UM CILINDRO DE VARETAS DE
UMA COLHEDORA DE CAFÉ PARA DIAGNÓSTICO DE FALHA**

Este artigo está formatado de acordo com as normas da "ForScience". É uma versão final,
aceita pelo conselho editorial do periódico.

ANÁLISE EXPERIMENTAL EM UM CILINDRO DE VARETAS DE UMA COLHEDORA DE CAFÉ PARA DIAGNÓSTICO DE FALHA

RESUMO

Colhedoras de café trabalham com um sistema de vibração para promover a derriça dos grãos. O sistema de vibração geralmente é acoplado na extremidade de um eixo, denominado por cilindro vibrador de varetas. Este cilindro pode apresentar falhas em campo, as quais geralmente ocorrem por fratura na região da solda entre o cilindro e seu flange. Observa-se em campo que, este tipo de falha ocorre em um curto intervalo de tempo, antes de 12 meses de trabalho constante, o que requer diagnóstico de falhas. Este trabalho tem como objetivo principal realizar o diagnóstico de falha em um cilindro vibrador de varetas de uma colhedora de café. Para isso, foi realizado o mapeamento da fratura e foram confeccionados corpos de prova para a realização de ensaios mecânicos destrutivos e não destrutivos (ensaio de tração, análise química dos materiais do cilindro vibrador de varetas e flange, metalografia das juntas soldadas e ensaios de dureza *Vickers* e *Brinell*). Os resultados das análises químicas e de dureza *Brinell* comprovaram que o material do cilindro de varetas se trata de um aço de baixo teor de carbono. Os resultados de dureza *Vickers* evidenciaram a não homogeneidade do metal depositado. Os resultados obtidos nos ensaios de tração foram próximos à valores encontrados na literatura, exceto para o alongamento. Os resultados metalográficos da junta soldada evidenciaram defeitos, como trinca e porosidade, que podem influenciar a fratura. Neste sentido, foi proposto um procedimento de soldagem (EPs) para a melhoria do processo de fabricação da peça analisada.

Palavras-chave: Colhedora de café. Ensaio mecânicos. Diagnóstico de falhas.

1 INTRODUÇÃO

A mecanização agrícola em grande escala aconteceu com a utilização de máquinas colhedoras após a segunda guerra mundial. A partir do desenvolvimento tecnológico ocorrido neste período, foi possível desenvolver tratores e colhedoras de grande porte. Antes disso, a colheita do café era realizada manualmente ou de forma semi-mecanizada. Atualmente, o mercado de máquinas agrícolas conta com modernas derriçadoras de café, podendo ser autopropelidas ou tracionadas por tratores. Independentemente do tipo, estas máquinas trabalham em uma determinada faixa de frequência de vibrações para atingir a frequência de ressonância do pedúnculo do grão de café, promovendo a derriça (COELHO *et al.*, 2015).

As colhedoras de café são projetadas com dois cilindros de varetas, os quais são responsáveis por promover a vibração dos galhos da planta de café durante a colheita, conforme esquema apresentado na Figura 1. Geralmente, estes cilindros são produzidos a partir de um tubo sem costura, cuja especificação é aço SAE 1010 a SAE 1030 com 0,5% de Mo (Molibdênio) e 0,5% Cr (Cromo). Estes cilindros de varetas geralmente possuem

42 espessura de parede de 9 mm e diâmetro externo de 150 mm (CAMINAGA e BUTTON,
43 2013). Para realizar a função de derriça dos grãos de café, o cilindro de varetas trabalha em
44 modo de vibração. A frequência de vibração possui faixa de regulagem, que é compreendida
45 pela força de desprendimento do grão de café, os quais variam entre 7,54 N a 11,81 N para a
46 condição de maturação de café tipo verde até cereja, e, entre 5,44 N a 7,21 N, para a condição
47 de maturação de café tipo Catuaí vermelho (COELHO *et al.*, 2015).

48



49

50

Figura 1- Dois cilindros de varetas de nylon, responsáveis por realizar a colheita

51

52 Nos dois cilindros de varetas da colhedora, são soldados pequenos tubos que servem
53 de suporte para receber as varetas de nylon, os quais são responsáveis por promover a
54 derriça dos grãos de café por meio de vibrações mecânicas. Na extremidade superior ou
55 inferior do cilindro de vareta, dependendo do modelo da colhedora de café, são soldados
56 eixos de aço maciço com especificação SAE 1045 para acoplamento de mancais. A
57 soldagem entre o cilindro e dois flanges ocorre pelo processo soldagem a arco elétrico sob
58 proteção gasosa ativa com alimentação de arame consumível (MAG), conforme
59 NBR13043 (ABNT, 1993), também denominado por Gas-Shielded Metal Arc Welding
60 (GMAW), sendo um flange com diâmetro de 260 mm e espessura de 26 mm e outro com
61 um diâmetro de 360 mm e espessura 35 mm, equidistantes de 150 mm (MACABÚ;
62 SANTOS; LIMA, 2014).

63

64 As indústrias em geral têm apresentado preocupação com respeito à qualidade da
65 solda empregada em seus equipamentos. A escolha correta do processo e do procedimento
66 de soldagem visa garantir êxito e qualidade do produto final. A soldagem realizada
67 conforme normas AWS (*American Welding Society*) garante a resistência mecânica do
equipamento e especifica os testes que devem ser realizados para determinar as

68 propriedades mecânicas da junta soldada para cada tipo de solda (ARIAS;
69 BRACARENSE, 2015).

70 Máquinas agrícolas derriçadoras normalmente trabalham com frequências próximas
71 à ressonância do material orgânico de derriça. Considerando vibrações aliadas a
72 imperfeições em regiões soldadas na estrutura destas máquinas podem originar fraturas em
73 componentes ou sistema mecânico (SILVA *et al.*, 2018; SOUZA *et al.*, 2018; FERREIRA
74 JUNIOR *et al.*, 2016). Diante disso, este trabalho tem como objetivo principal, realizar
75 uma investigação na fratura ocorrida entre a solda de um cilindro vibrador de varetas de
76 uma colhedora de café e seu flange. Para isso, foram realizados ensaio de análise química
77 por espectrometria óptica do material do cilindro e flange, além de ensaios de tração em
78 corpos de prova extraídos da peça fraturada, ensaios de dureza *Brinell* para averiguar a
79 resistência à penetração, com a finalidade de validar os resultados da análise química, para
80 averiguar as propriedades mecânicas do aço que constitui o cilindro vibrador de varetas.
81 Além disso, ensaios de dureza *Brinell* e *Vickers* foram realizados para avaliar a região
82 soldada, sendo recomendados para análise de dureza pós-soldagem (CHIAVERINI, 1986).
83 Realizou-se ainda a análise de características microestruturais por microscópio eletrônico
84 de varredura (MEV) para revelar a solda e indicar a zona termicamente afetada, defeitos
85 provenientes do processo de soldagem e características de fatura dúctil e frágil. A partir
86 dos resultados encontrados, foi realizada um diagnóstico de falha, como em Magalhães *et*
87 *al.*, (2012).

88 Todos os ensaios foram realizados no intuito de prover informações relevantes sobre
89 o material analisado e investigar o motivo da falha e, conseqüentemente, propor correções
90 no processo de fabricação do cilindro de varetas, a fim de não danificar a máquina e
91 comprometer a colheita, evitando-se manutenções periódicas.

92

93 **2 MATERIAIS E MÉTODOS**

94

95 Este trabalho foi iniciado após a ocorrência de uma fratura em campo no cilindro de
96 varetas de uma colhedora de café, depois de três anos de atividade em uma lavoura do sul de
97 Minas Gerais, nas proximidades da cidade de Elói Mendes, em que a empresa fabricante da
98 máquina cedeu a peça fraturada para análise. A partir daí, iniciou-se diagnóstico da falha,
99 buscando-se investigar a origem da fratura na base do cilindro de varetas, a qual se estendeu
100 em forma espiral, conforme Figura 2.

101



Figura 2- Região fraturada do cilindro de vareta de uma colhedora de café.

102

103

104

105

106

107

108

109

110

111

112

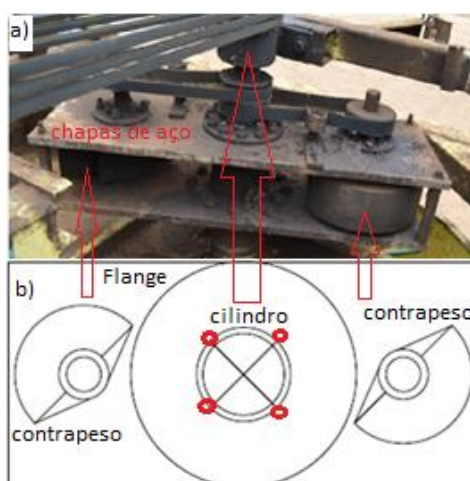
113

114

115

116

Na colhedora analisada, o sistema mecânico que promove a vibração do cilindro de varetas está localizado na região inferior da máquina. Este sistema está acoplado ao cilindro de varetas, que é produzido a partir de duas chapas de aço SAE 1020. As duas chapas têm dimensões de 750 mm de comprimento, 360 mm de largura e 15 mm de espessura. Estas chapas possuem furos de diâmetro de 55 mm no centro para realizar a fixação do eixo do cilindro de varetas. Equidistantes deste furo, existem dois outros furos de mesmo diâmetro para alojamento dos dois contrapesos de 25kg cada um. Nos quatro vértices das duas chapas são fixados 4 parafusos espaçadores com 30 mm de diâmetro cada. No interior das duas chapas foram alojados dois contrapesos que giram em função do cilindro de varetas com o auxílio de polias e correia dentada, com a finalidade de realizar a vibração do sistema, conforme esquema apresentado na Figura 3.



117

118

119

120

Figura 3-(a) Mecanismo de vibração e (b) esquema de contrapesos do cilindro de varetas

121 Há informação por parte do fornecedor da colhedora que o flange é soldado no
122 cilindro utilizando o processo GMAW/MAG. A espessura da parede do cilindro de varetas é
123 de 9 mm e do flange é de 35 mm.

124 Notou-se que a fratura no cilindro de varetas iniciou-se na região soldada entre o flange
125 inferior e o cilindro. Segundo BANNANTINE et al. (1990), as amostras utilizadas para testes
126 devem ser originadas de regiões de ocorrência da fratura. Assim, amostras do cilindro de
127 varetas e flange foram mapeadas e, em seguida, retirados corpos de prova (CPs), conforme
128 Figura 4. Foram confeccionados 7 CPs do flange e 7 CPs do cilindro vibrador de varetas para
129 diagnóstico da falha, sendo retirados em posições denominadas por CP1, CP2 e CP3, em que
130 CP1 e CP2 correspondem ao cilindro vibrador de varetas e CP3 à região soldada entre flange
131 e cilindro vibrador de varetas, divididos da seguinte forma:

- 132 • 2 CPs para análise química na posição CP1 e CP3;
 - 133 • 1 CP para ensaio de dureza *Brinell* na posição CP1;
 - 134 • 1 CP para ensaios MEV da região de fratura na posição CP1;
 - 135 • 3 CPs para ensaios de tração do cilindro de varetas na posição CP2;
 - 136 • 3 CPs para ensaios metalográficos da junta soldada na posição CP3;
 - 137 • 3 CPs para ensaios de revelação da solda nital 10% da junta soldada CP3;
 - 138 • 3 CPs para ensaios de dureza *Vickers* na região da junta soldada CP3.
- 139



140

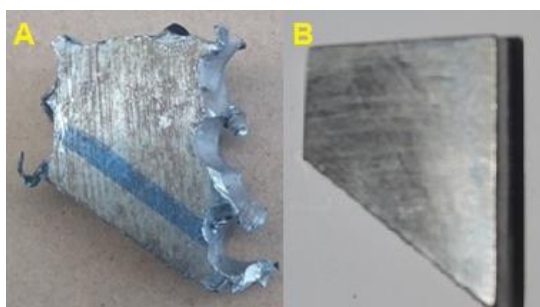
141 Figura 4- Retirada de CPs para análises (CP1) de fratura, (CP2) químicas e de tração, (CP3) da junta soldada
142

143 Após separação, as amostras foram preparadas para análise química no intuito de
144 verificar as características do material do cilindro vibrador de varetas e do flange, que
145 evidenciam as propriedades mecânicas do aço por meio das frações volumétricas das
146 propriedades químicas (AMARAL et al., 2017). O ensaio de dureza *Brinell* foi usado para
147 identificar as características de resistência à penetração do material do cilindro vibrador de
148 varetas no intuito de comparar com os resultados da análise química do mesmo material.

149 Como procedimento de preparação do CP1 e CP3, retirou-se a região a ser analisada, a
150 qual foi limada e polida (Figura 5 e 6), para realizar o ensaio de espectrometria de emissão
151 ótica, utilizando o espectrômetro Spectromax, calibrado pelo fabricante, com confiabilidade
152 de 95%, realizando os ensaios a uma temperatura de 28°C utilizando as normas ASTM E
153 415:2017 (ASTM, 2017), ASTM E 1086:2014 (ASTM, 2014) e ASTM A 751:2014 (ASTM,
154 2014), segundo instruções técnicas IT Lab 249 revisão 09.

155 O ensaio de dureza *Brinell* no cilindro vibrador de varetas foi realizado a partir do
156 emprego dos equipamentos durômetro universal dura vision DV30 e termo-higrômetro
157 digital, ambos calibrados pelo laboratório Rede Brasileira de Calibração (RBC), a uma
158 temperatura de 23,4°C, com penetrador de 2,5 mm de diâmetro e a aplicação de uma carga de
159 187,5 Kgf, utilizando três testes de penetração, segundo a norma NBR ISO 6506-
160 1:2010(ABNT, 2010).

161

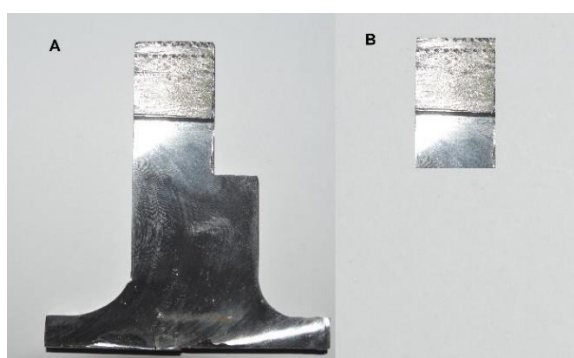


162

163

Figura 5- Preparação corpo de prova para análise química e dureza Brinell

164



165

166

Figura 6-Corpo de prova para espectrometria de emissão ótica

167

168 Os CPs foram retirados para ensaios de tração por meio de um maçarico que trabalha
169 com temperaturas elevadas (acima de 1400 C° para fusão do material). Por esse motivo,
170 alguns cuidados foram tomados, principalmente, respeitando-se o aporte térmico do processo

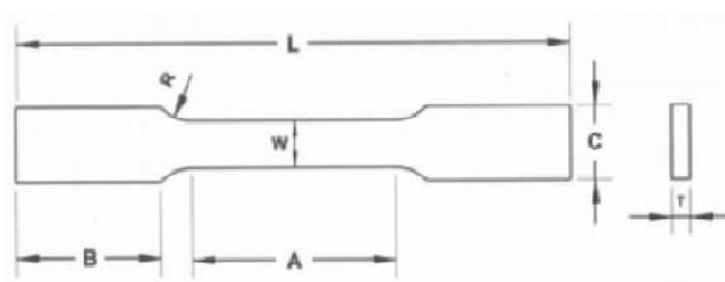
171 e elevação da dureza nas proximidades do corte. Foram considerados mais de 6 mm de
 172 sobremetal nos *blanks*, tanto no comprimento quanto na largura para fins usinagem final e
 173 consequente obtenção dos CPs (Figura 7). Vale ressaltar que os CPs para os ensaios de tração
 174 foram usinados conforme norma NBR ISO 6892-1:2013 (ABNT, 2013), com dimensões
 175 padrão, conforme especificações do tipo 1 (Figura 8). O procedimento para o ensaio de tração
 176 foi realizado à temperatura de 24,5°C, utilizando uma máquina universal de ensaio.
 177



178

179

Figura 7 - Preparação dos *blanks*(A) e confecção dos CPs (B) para ensaio de tração.



| Tipo | A | B | C | W | R | L |
|------|-------|-------|-------|---------|-------|--------|
| 1 | 32 mm | 32 mm | 10 mm | 6,25 mm | 6 mm | 100 mm |
| 2 | 60 mm | 50 mm | 20 mm | 12,5 mm | 13 mm | 200 mm |
| 3 | 60 mm | 50 mm | 50 mm | 40 mm | 13 mm | 200 mm |

180

181

182

Figura 8 - Dimensões de CPs para o ensaio de tração conforme norma ASTM A370 (ASTM, 2012)

183

184

185

186

187

Utilizando parte da fratura extraída do CP1, procedeu-se a análise química e dureza *Brinell* do material com auxílio do MEV (modelo JEOL – JSM-6510LV) a partir da fixação da amostra em um suporte metálico e inserção no porta amostra do microscópio, realizando a análise em duas regiões da amostra (Figura 9).



Figura 9 - Regiões de fratura submetidas à análise MEV

188

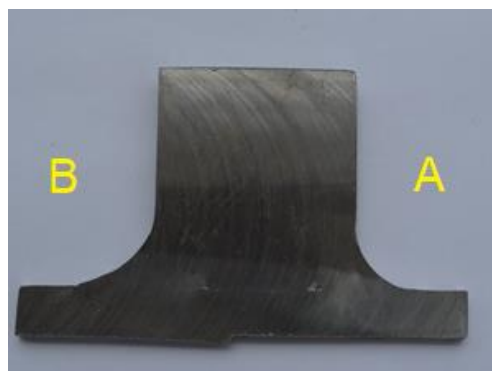
189

190

191 Por fim, analisou-se a região soldada (CP3), utilizando-se dois procedimentos, sendo a
192 análise de dureza *Vickers*, para verificar a resistência mecânica a penetração e a metalografia
193 com ataque de ácido nital 10%, para revelar os cordões de solda, possíveis discontinuidades,
194 zona fundida e aporte térmico (Figura 10).

195 O ensaio de dureza *Vickers* foi realizado para análise de pequenas regiões, utilizando
196 um penetrador em formato de pirâmide com diâmetro de base quadrada em sete pontos da
197 peça, por meio da aplicação de uma carga de 10 Kgf a uma temperatura de 22,3 °C, conforme
198 norma NBR ISO 6507-1 (ABNT, 2008), a partir de Microdurômetro ótico Wolpert e
199 Shimadzu.

200



201

202

Figura 10 - CP3 para os ensaios metalografia nital 10% e dureza Vickers

203

204 3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

205

206 Os resultados da análise química do material do cilindro e flange estão apresentados
207 na Tabela 1.

208

209

210

Tabela 1 - Análise química dos materiais do cilindro e flange

211

212

213

214

215

216

217

218

219

220

221

| Elementos | Concentração no cilindro (%) | Concentração no flange (%) |
|-----------------|------------------------------|----------------------------|
| Carbono (C) | 0,2113 | 0,2066 |
| Manganês (Mn) | 0,8446 | 1,1518 |
| Silício (Si) | 0,1872 | 0,1737 |
| Fósforo (P) | 0,0162 | 0,0220 |
| Enxofre (S) | 0,0075 | 0,0072 |
| Cobre (Cu) | 0,0014 | 0,0047 |
| Cromo (Cr) | 0,0311 | 0,0188 |
| Níquel (Ni) | ND | ND |
| Molibdênio (Mo) | 0,0096 | 0,0063 |
| Vanádio (V) | 0,0009 | 0,0019 |
| Tungstênio (W) | ND | ND |
| Titânio (Ti) | 0,0020 | 0,0148 |

222

Fonte: Dos autores (2018).

223

224

225 Os resultados da análise química apresentam elementos que contribuem direta ou

226 indiretamente para aumento da dureza do material, sendo que a quantidade destes elementos

227 foi considerada baixa para os dois materiais analisados, em torno de 0,20% C, o que

228 caracteriza aços com baixo teor de carbono. Os outros elementos importantes, como Silício

229 (Si), com 0,17 % Manganês (Mn), com 1,15 %, são considerados desoxidantes. É importante

230 salientar que o Manganês (Mn) acima de 1,6 % aumenta a resistência à abrasão do material.

231 Os demais elementos, como o fósforo (P) e o enxofre (S), são considerados impurezas

232 originados no início do processo de fabricação do material e podem comprometer o processo

233 de soldagem. A presença de cobre (Cu) no aço pode ser considerada benéfica para a redução

234 de corrosão, com valores inferiores a 0,6 %. O Cromo (Cr), Níquel (Ni), Vanádio (V),

235 Molibdênio (Mo), Tungstênio (W), Titânio (Ti) são considerados elementos presentes nos

236 aços liga. Como estes elementos apresentam baixa concentração, pode ser desconsiderada a

237 possibilidade de se tratar de um aço liga (JUNIOR et al., 2013).

238 Diante das análises químicas do flange e do cilindro de varetas, por se tratar de aço de

239 baixo teor de carbono, deu-se atenção para o teor do carbono equivalente (CE) (MARQUES e

240 MODENESI, 2014), conforme Equação 1.

$$CE = C + \frac{Mn}{6} + \frac{Cr + Mo + V}{5} + \frac{Ni + Cu}{15} \quad (1)$$

241

242 O CE do material do flange foi de 0,40428% e do material do cilindro de varetas foi de
243 0,3607%. Com isso, pode-se afirmar que o material do flange está no limite da boa
244 soldabilidade. Neste sentido, o maior cuidado que deve ser tomado é no sentido de reduzir o
245 aparecimento da microestrutura de martensita. Esta microestrutura é dura, conseqüentemente
246 muito frágil, o que facilita o aparecimento de trincas na região da Zona Termicamente
247 Afetada (ZTA) do material soldado (MARQUES e MODENESI, 2014; ALBUQUERQUE et
248 al., 2010).

249 A utilização do procedimento de pré-aquecimento do material do flange pode
250 favorecer a execução da soldagem, evitando-se trincas por hidrogênio, o que possibilita
251 trabalhar com correntes e tensões baixas. Isso pode reduzir o aparecimento de mordeduras nas
252 margens da solda. Outro fator a ser levado em consideração é a taxa de resfriamento, o que
253 reduz o aparecimento de microestrutura indesejável como a martensita e proporciona o
254 aparecimento da microestrutura bainita.

255 Os resultados de dureza *Brinell* (HB) comprovaram que o material do cilindro de
256 varetas se trata de um aço de baixo teor de carbono, conforme Tabela 2.

257

258

Tabela 2 - Análise de dureza Brinell do material do cilindro de varetas

259

260

261

262

| Ensaio | Resultados (HB) |
|---------------|------------------------|
| Valor 1 | 150,0 |
| Valor 2 | 149,0 |
| Valor 3 | 151,0 |
| Média | 150,0 |

263

264

Fonte: Dos autores (2018).

265

266

267

268

269

No intuito de se verificar a influência da microestrutura resultante no material em
função do processo da soldagem, foram realizados ensaios de dureza *Vickers* na região da
solda nos três CPs onde ocorreu fusão, conforme Figura 11.

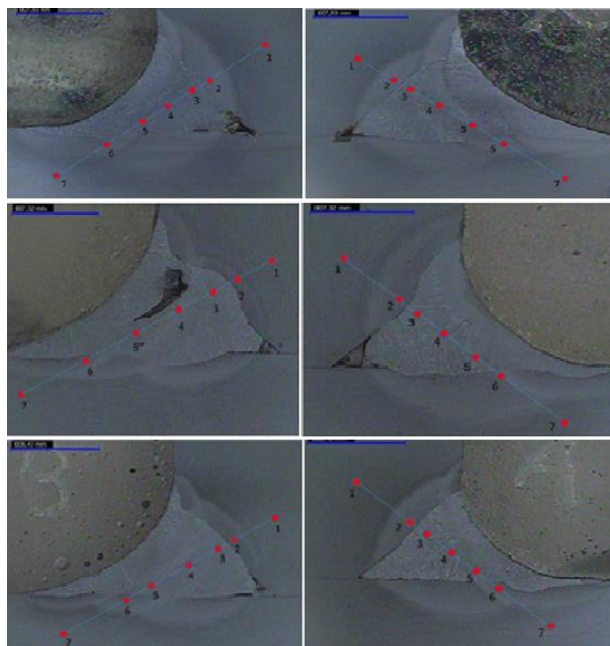


Figura 11 - Pontos coletados nos ensaios de dureza
Fonte: Dos autores (2018).

270
271
272

273

274 Os ensaios de dureza *Vickers* (HV) na região transversal da solda forneceram valores
275 (Tabela 3) que não evidenciaram a homogeneidade do metal depositado, apenas comprovam
276 dureza menor no metal base, dureza maior na ZTA e dureza intermediária (no geral) no metal
277 de adição. Os valores de dureza foram extraídos a partir de sete impressões no material,
278 partindo do flange e percorrendo a ZTA até o metal base do cilindro de varetas.

279

280

Tabela 3 - Resultados dos ensaios de dureza Vickers

| Pontos | CP1A | CP1B | CP2A | CP2B | CP3A | CP3B | Desvio padrão Linear |
|------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|----------------------|
| | (HV) | (HV) | (HV) | (HV) | (HV) | (HV) | |
| 1 | 154,7 | 154,7 | 161,7 | 155,0 | 159,1 | 170,1 | 5,52 |
| 2 | 216,5 | 216,5 | 210,0 | 200,1 | 215,4 | 220,3 | 6,57 |
| 3 | 208,3 | 208,3 | 213,2 | 209,3 | 211,8 | 212,5 | 2,00 |
| 4 | 202,5 | 202,5 | 203,8 | 192,5 | 204,1 | 206,9 | 4,52 |
| 5 | 198,8 | 198,8 | 200,5 | 178,7 | 197,2 | 197,2 | 7,46 |
| 6 | 177,0 | 177,0 | 179,2 | 187,0 | 190,6 | 193,1 | 6,54 |
| 7 | 153,0 | 153,0 | 151,5 | 148,2 | 166,8 | 242,3 | 33,24 |
| Desvio padrão CP | 23,91 | 23,91 | 22,75 | 21,01 | 20,12 | 21,04 | |

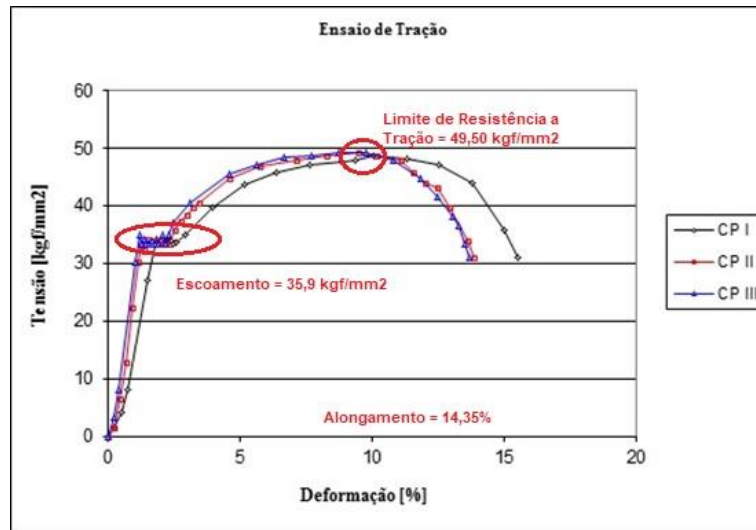
281
282
283
284

Fonte: Dos autores (2018).

285

Quando comparado com os resultados de SILVA e BRACARENSE (2003), Figura 12, em que a média dos valores de resistência mecânica e escoamento, foram 49,50

286 kgf/mm e 35,9 kgf/mm², respectivamente, nota-se que o limite de resistência a tração
 287 média obtido neste trabalho foi de 53,03 kgf/mm² e o escoamento ocorreu em uma média
 288 de 35.1 kgf/mm² (Tabela 4), ou seja, valores próximos, exceto para o alongamento.
 289



290

291

Figura 12 - Gráfico de tensão por deformação (SILVA e BRACARENSE, 2003).

292

293

Tabela 4 - Ensaio de tração do material do cilindro

| Ensaio | un. | CP1 | CP2 | CP3 |
|-------------------------------------|---------------------|------------|------------|------------|
| Resistência à tração (Rm) | Kgf/mm ² | 52,4 | 53,4 | 53,3 |
| Resistência ao Escoamento Superior | Kgf/mm ² | 35,7 | 35,1 | 34,5 |
| Alongamento Percentual Após Ruptura | % | 40,0 | 41,0 | 41,5 |
| Largura | mm | 6,32 | 6,32 | 6,32 |
| Espessura | mm | 8,25 | 8,25 | 8,25 |
| Força Máxima (Fm) | kgf | 2734 | 2784 | 2778 |

294

295

296

297

Fonte: Dos autores (2018)

298

299

300

301

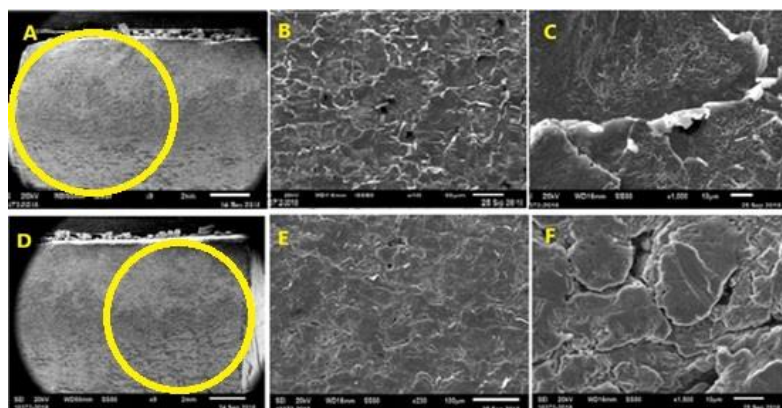
302

303

Outro fator importante, que deve ser levado em consideração, é o surgimento das trincas induzidas pela presença de hidrogênio. Consumíveis mal armazenados, sujeiras, graxas, óleo, poeira e umidade são fontes de hidrogênio que pode penetrar no material na solda e se dissociar em austenita após 48 horas, podendo surgir trincas na ZTA ou no cordão de solda (MARQUES e MODENESI, 2014; ALBUQUERQUE et al., 2010). Neste caso, a utilização do MEV pode facilitar a observação e análise de como as trincas evoluíram no material evoluíram na região soldada.

304 Uma parte da região fraturada do cilindro foi utilizada para ensaios MEV para
 305 avaliação da fratura. Esta investigação direcionou alguns pontos importantes em relação ao
 306 estudo de caso. Para isso, foi realizada uma varredura em duas regiões dos CPs, onde foi
 307 possível observar fratura dúctil (Figuras 13B e 13C), uma vez que não foi observado
 308 aparecimento de crivagem. Já na segunda região fraturada, observou-se fratura frágil,
 309 devido a presença de crivagem (Figuras 13E e 13F,) além de trincas nos contornos de grãos
 310 (Figura 13F).

311



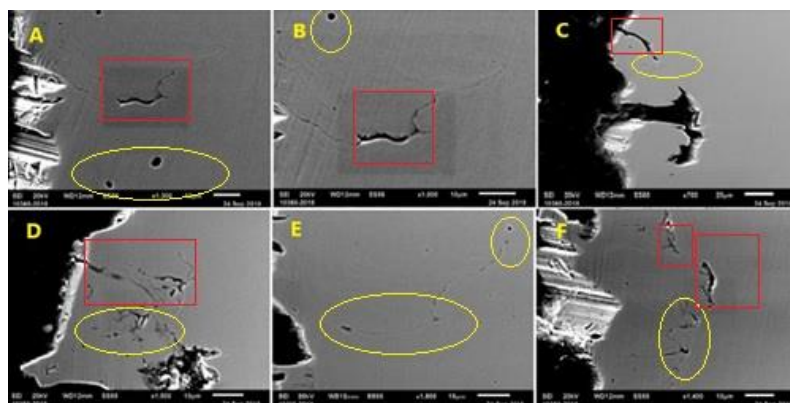
312

313 Figura 13 - Primeira região fraturada da amostra com aumento de 9x(A), 150x(B) e 1000x(C); Segunda região
 314 fraturada em MEV(D) com aumento de 1600x(E) e 1400x(F) Fonte: Dos autores (2018).

315

316 A partir dos ensaios no MEV, também foi possível observar micro trincas
 317 (retângulos em vermelho nas Figuras 14A, B, C D e F) e inclusões nas extremidades do
 318 material do cilindro de varetas, circuladas em amarelo na Figura 14.

319



320

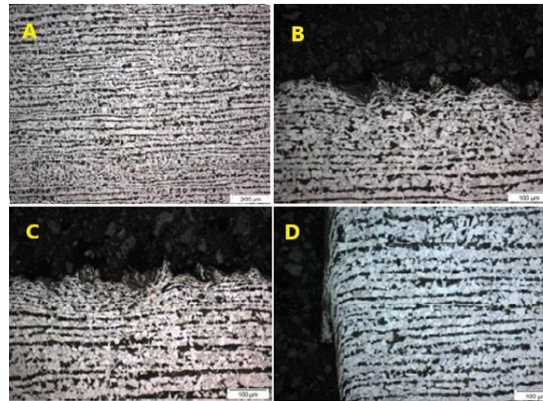
321 Figura 14 - Regiões de fratura no material do cilindro de varetas (A, B, C, D, e F) e inclusões no material, com
 322 aumento de 1000 vezes (A, B, e E) Fonte: Dos autores (2018).

323

324 Pode-se notar ainda a presença de microestruturas de ferrita nas amostras (parte
 325 clara da Figura 15) e perlita (parte escura da Figura 15), além de deformação plástica nas

326 extremidades dos CPs. A partir das imagens coletadas via MEV notou-se que, diante da
 327 composição química das amostras e o processo de fabricação do material, esta estrutura era
 328 esperada.

329



330

331 Figura 15 - Presença de microestruturas de ferrita e perlita com aumento de 100x(A) e com aumento de 200x (B,
 332 C e D) Fonte: Dos autores (2018).

333

334 O resultado da metalografia da solda com ataque de ácido nital 10% está
 335 apresentado na Figura 16.

336



337

338

Figura 16 - Ataque com ácido nital 10% para revelação da solda Fonte: Dos autores (2018).

339

340 Além da falta de fusão, outros defeitos na solda foram observados, como trinca e
 341 porosidade. Considerando que foi encontrada, na raiz da solda, falta de fusão e que isto
 342 pode ser indício de sujeiras na poça de soldagem, deve-se levar em conta o efeito da
 343 formação de trinca por hidrogênio. Observa-se estes defeitos de soldagem, com maior
 344 nitidez, com o auxílio da Figura 17.



Figura 17 - Detalhe da falta de fusão, trinca e porosidade Fonte: Dos autores (2018).

Os resultados metalográficos da junta soldada confirmaram uma quantidade considerável de pequenos defeitos, que somados, se tornam ameaças reais para a propagação de trincas. Podendo, ainda, estar relacionadas com outros problemas de soldagem, como a porosidades, falta de fusão e trincas. Problemas de soldagem da mesma natureza, como descontinuidades (porosidade) e trincas, também foram encontrados por Arias e Bracarense (2015), que avaliaram propagação de trinca por fadiga, porém em situações de soldas subaquáticas por meio de avaliação fora da água.

Notou-se ainda que, na região onde o sistema mecânico promove a vibração, foi realizada a usinagem no interior do cilindro de varetas até nas proximidades do centro do flange, reduzindo a espessura da parede menor para 8,0 mm. Uma seção transversal do cilindro é apresentada na Figura 18, evidenciando o quanto avançou a usinagem do cilindro de varetas na parte interna, o que pode ser indício de concentração de tensão na peça.

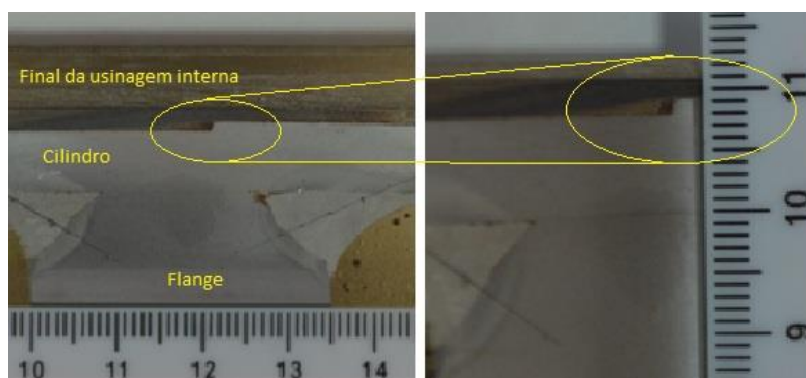
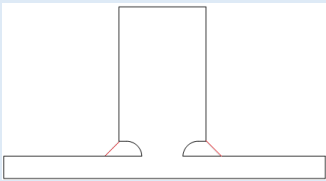


Figura 18 - Detalhe da região usinada do cilindro de varetas na parte interna Fonte: Dos autores (2018).

Após análise dos corpos de prova dos materiais e os resultados obtidos, os problemas encontrados na soldagem direcionam a uma proposta de melhoria do processo, trazendo como resultados alguns métodos que auxiliam no procedimento até então usado. São eles:

- Adicionar ao processo o aquecimento do flange para evitar o trabalho em altas tensões e correntes, evitando o aparecimento de descontinuidade no cordão de solda, além de

- 368 eliminar mordeduras no material do cilindro vibrador de varetas, evitando assim
369 possível início de trinca.
- 370 • Alterar chanfro duplo meio v para duplo j com a finalidade de evitar falta de fusão
371 raiz.
 - 372 • Incluir o processo de limpeza esmerilhado no início da soldagem, para eliminar
373 impurezas que podem ocasionar inclusões e possíveis contaminante de hidrogênio
374 para o metal fundido.
 - 375 • Fixar em três passes o procedimento, com a finalidade de padronizar e reduzir o aporte
376 térmico na ZTA.
 - 377 • O monitoramento de temperatura entre os passes pode ser útil para reduzir contração
378 desnecessária e reduz a dissociação do hidrogênio na austenita.
 - 379 • Pós aquecimento para reduzir a formação de microestruturas indesejadas e fornecer
380 alívio de tensão para região soldada.
- 381 O resumo das características da soldagem pode ser observada no Quadro 1 de
382 especificações de soldagem (EPS).
383

| EPS-Especificação do Processo de Soldagem | | | | | |
|--|--------|----------|--|----------|------------------------|
| Detalhe da Junta | | | | | |
| Descrição: Junta em formato duplo J | | | | | |
|  | | | | | |
| Metal Base: ER70S6 | | | Posição: Plana 2G Chanfro e 2F fora | | |
| Pré-aquecimento | | | Tratamento Térmico após soldagem | | |
| Temperatura de Preaquecimento (Mín.): 100 °C Temperatura de Interpasse (Máx.): 120 °C Manutenção do Preaquecimento: 100 a 120 °C | | | pós- aquecimento na faixa de 200 a 300 °C | | |
| Características elétricas | | | Técnica | | |
| Corrente: DC: (Faixa) 23 a 24 V. Corrente (faixa): 115 a 120A Tipo de transferência globular | | | Cordão Oscilante, Limpeza inicial (esmerilhamento) e interpasse (escovamento aço.) | | |
| Passe | Camada | Processo | Metal de Adição | | monitoramento entre os |
| | | | Especificação/Classificação | Diâmetro | |

| | | | | | |
|-------------|---|----|--------|--------|---|
| Raiz | 1 | ER | ER70S6 | 1.2 mm | passes, com a temperatura ente 100 a 120 °C |
| Enchimento | 2 | ER | ER70S6 | 1.2 mm | |
| Acabamentos | 3 | ER | ER70S6 | 1.2 mm | |

384 Quadro 1 - EPS para o processo de soldagem para a fabricação do cilindro vibrador de varetas da colhedora

385

386

387 4 CONCLUSÕES

388

389 A partir dos resultados encontrados em análise química dos materiais analisados, do
390 ensaio de tração, MEV, dureza e metalografia da solda, conclui-se que:

391 - Os materiais do cilindro vibrador de varetas e flange são provenientes de aços com
392 baixo teor de carbono equivalente, apresentando valores em torno de 0,36% C no cilindro e
393 0,40% C no flange.

394 - Os resultados dos testes de dureza *Brinell* serviram para confirmar o material
395 constituinte do cilindro vibrador de varetas e o baixo teor de carbono.

396 - O ensaio de tração apresentou valores de limites de resistência, escoamento e
397 alongamento do material, bem como as características mecânicas do tubo, sendo comparado
398 com valores da literatura, que apresentou resultados similares, exceto para o alongamento.

399 - Em relação ao processo de soldagem, realizou-se revelação em ácido nital 10%,
400 obtendo-se uma área de zona térmica afetada e passes de solda não uniformes, entre dois e
401 três passes. Além disso, foram reveladas regiões de descontinuidade, falta de fusão, trincas e
402 porosidade.

403 - Ensaio de dureza *Vickers* demonstraram que, para um mesmo ponto analisado em
404 diferentes amostras, não houve comportamento uniforme, mas em pontos da mesma peça o
405 comportamento foi homogêneo, o que pode inferir em defeito no material do cilindro vibrador
406 de varetas.

407 - Baseado na vibração da máquina para promover a colheita e o processo de fabricação
408 da peça, devido à defeitos internos no material do cilindro vibrador de varetas, na soldagem,
409 combinado com a vibrações cíclicas, pode-se diagnosticar que a fratura ocorreu por falhas no
410 processo de fabricação do conjunto, principalmente na região da solda entre o cilindro
411 vibrador de varetas e seu flange.

412 No intuito de se evitar defeitos provenientes do processo de soldagem do cilindro
413 vibrador de varetas, sugeriu-se um EPS, levando-se em consideração um pré-aquecimento na
414 faixa de 130 °C, limpeza antes da realização da soldagem, monitoramento entre passes, com a
415 temperatura ente 100 a 120 °C, pós-aquecimento na faixa de 200 a 300 °C, seguido de um
416 resfriamento controlado, em forno ou coberto com manta térmica de refratário, o que tende a
417 reduzir a probabilidade de trincas na região de solda, no intuito de aumentar a vida útil da
418 colhedora analisada.

419

EXPERIMENTAL ANALYSIS IN A COFFEE HARVESTER CYLINDER FOR FAILURE DIAGNOSIS

ABSTRACT

Coffee harvesters work with vibration system in order to promote the breaking of the grains peduncle. The vibration system is generally attached to the end of an axle, named as vibrating rod cylinder. This cylinder can have failures on duty, which usually occurs by fracture failure in the weld region between the cylinder and its flange. It is observed that this type of failure occurs in a short time, before 12 months of constant work, which requires a failure diagnosis. Then, the main objective of this work is to perform the fault analysis in the vibrating rod cylinder of a coffee harvester. For this, the fracture mapping was performed and it were made specimens for destructive and non-destructive mechanical tests, such as tensile testing, chemical analysis of the pipe and flange materials, metallography of the welded joints and hardness testing Vickers and Brinell.

Through these tests, it was observed problems due to the welding process applied between the rod cylinder and the flange, and to manufacturing defects of the axle (arising from the casting process). As a result, there is a fatigue failure process leading to a short service life in the cylinder-flange assembly. To solve this problem, a welding procedure (EPs) is proposed to improve the fabrication of this assembly and the formulation of a methodology for pipe selection.

Keywords: Coffee harvester. Mechanical tests. Failure diagnosis.

REFERÊNCIAS

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR ISO 6506-1:2010. Materiais metálicos – Ensaio de dureza Brinell - Parte 1: Método de ensaio. 2010.

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR ISO 6507-1:2010. Materiais metálicos - Ensaio de dureza Vickers - Parte 1: Método de Ensaio, 2010.

ABNT ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR ISO 6892-1: Materiais metálicos – Ensaio de tração Parte 1: Métodos de ensaio à temperatura ambiente.2013.

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 13043. Soldagem: números e nomes de processos – Padronização. Rio de Janeiro: ABNT, 1993.

ALBUQUERQUE, S. F.; MACIEL, T. M.; SANTOS, M. A.; BRACARENSE, A. Q.; Evaluation of Microstructure and Mechanical Properties of weld metals obtained by Manual and Automated Welding Process Used in the Welding of API 5L X80 Steel. Soldagem & Inspeção. v.16 n.4, Oct./Dec. 2011

459

460 AMARAL, T.S.; CARBONI, M. C.; SCOTTI, A. Application Assessment of a Welding Atlas
461 of a Niobium Microalloyed Bainitic Steel. Soldagem & Inspeção, v. 22, n.2, p.163-173, Jun.
462 2017.

463

464 ASTM A370. Standard Test Methods and Definition for Mechanical Testing of Steel
465 Products. American Society for Testing and Materials, U.S.A, 2012.

466

467 ASTM E415. Standard Test Method for Analysis of Carbon and Low-Alloy Steel by Spark
468 Atomic Emission Spectrometry. U.S.A, 2017.

469

470 ASTM E1086. Standard Test Method for Optical Emission Vacuum Spectrometric Analysis
471 of Stainless Steel by the Point-to-Plane Excitation Technique, ASTM International, West
472 Conshohocken, U.S.A, 2014.

473

474 ASTM A751, Standard test methods, practices, and terminology for chemical analysis of steel
475 products , U.S.A, 2014.

476

477 ARIAS, A.R.; BRACARENSE, A.Q. Velocidade de Propagação de Trinca por Fadiga de
478 Soldas Subaquática Molhadas: Avaliação Fora da Água. Soldagem e Inspeção, v.20, n.4,
479 p.403-411, Dez. 2015.

480

481 BANNANTINE, J.; COMER, J.; H, JAMESL. Fundamentals of metal fatigue analysis
482 University of Illinois. Englewood Cliffs, NJ, Prentice Hall, 1990, 286 p.

483

484 CAMINAGA, C.; BUTTON, S.T. Mechanical Properties of Ausforged 27 MnSiVS6
485 Microalloyed Steel. Rem: Revista Escola de Minas, v. 66, n3, p.331-338, Jul. 2013.

486

487 CHIAVERINI, Vicente. Tecnologia Mecânica: materiais de construção mecânica. Vol. III. 2ª
488 Ed. São Paulo: Editora Makron Books, 1986.

489

490 COELHO, A.L.F.; SANTOS, F.L.; PINTO, F.A.C.; QUEIROZ, D. M. Determinação das
491 Propriedades Geométricas, Físicas e Mecânicas do Sistema Fruto-Pedúnculo-Ramo do

- 492 Cafeeiro. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, v.19, n.3, p.286-292, Mar.
493 2015.
494
- 495 FERREIRA JUNIOR, L.G.; SILVA, F.M.; FERREIRA, D.D.; SALES, R.S. Recomendação
496 para colheita mecânica do café baseado no comportamento de vibração das hastes
497 derriçadoras, Ciência Rural, v.46, n.2, p.273-278, Out. 2016.
498
- 499 JUNIOR, J.C.S. ; ROCHA, D.B.; BRANDI, S.D.; Uma Breve Revisão Histórica do
500 Desenvolvimento da Soldagem dos Aços API para Tubulações. Soldagem & Inspeção, v.18,
501 n.2, p.176-195, Abr/Jun. 2013.
502
- 503 MACABÚ, L.P.; SANTOS, S.H. C.; LIMA, S.S. Comparative analysis of solutions in
504 shallow foundations or in pile foundations for an industrial machine. IBRACON de Estruturas
505 e Materiais, v.7, n.2, p.208-227, Abr. 2014.
506
- 507 MAGALHÃES, R.R.; FONTES, C. H.O.; MELO, S.A.B.V. Failure analysis and design of a
508 front bumper using finite element method along with durability and rig tests. International
509 Journal of Vehicle Design, v.60, n.1/2, Set. 2012.
510
- 511 MARQUES, P. V.; MODENESI, P. J.; Algumas equações úteis em soldagem. Artigo, Revista
512 Soldagem & Inspeção. São Paulo, Vol. 19, Nº. 01, p. 091-102, Jan/Mar 2014.
513
- 514 SILVA, E.P.; SILVA, F.M.; ANDRADE, E.T.; MAGALHAES, R. R. Structural static and
515 modal frequency simulations in a coffee harvester`s chassis. Revista Brasileira de Engenharia
516 Agrícola e Ambiental, v.22, n.7, p.511-515, Jul. 2018.
517
- 518 SILVA, C. A.; BRACARENSE, A. Q. Procedimento de Soldagem para Recuperação de
519 Equipamentos de Aço Carbono Exposto a Grande Quantidade de Hidrogênio. Congresso
520 Brasileiro de Engenharia de Fabricação, mai. 2003.
521
- 522 SOUZA, V.H.S.; DIAS, G.L.; SANTOS, A.A.R.; COSTA, A.L.G.; SANTOS, F.L.;
523 MAGALHAES, R.R. Evaluation of the interaction between a harvester rod and a coffee
524 branch based on finite element analysis. Computers and Electronics in Agriculture, v.150,
525 p.476-483, Jul. 2018.

SEGUNDA PARTE - ARTIGO 2

**ARTIGO 2 - DESENVOLVIMENTO DE UMA COLHEDORA DE CAFÉ EM ESCALA
PARA BANCADA DE TESTES**

Este artigo está formatado de acordo com as normas da revista Revista Brasileira de Agropecuária Sustentável. É uma versão preliminar, poderá ocorrer alterações para adequá-lo ao estilo proposto.

DESENVOLVIMENTO DE UMA COLHEDEDORA DE CAFÉ EM ESCALA PARA BANCADA DE TESTES

Ricardo Rodrigues Magalhães¹, Ednilton Tavares de Andrade¹, Carlos Ademir da Silva²,
Leomar Santos Marques³, Alexandre Assis Rezende Santos³

RESUMO – As colhedoras de café trabalham com um sistema de vibração para promover a derriça dos frutos. O sistema de vibração, geralmente, é acoplado na extremidade de um eixo, denominado por cilindro vibrador de varetas. Esse cilindro pode apresentar falhas em campo, as quais, geralmente, ocorrem, por fratura no contorno do cilindro de varetas, com um ângulo de aproximadamente, 45°. Observa-se, em campo, que esse tipo de falha ocorre em um curto intervalo de tempo, aproximadamente de 1669h a 2496h de trabalho constante de 8h por dia, o que requer diagnóstico de falhas. Nesse sentido, este trabalho tem por objetivo principal o desenvolvimento de um protótipo de bancada para análises de comportamento mecânico de uma colhedora de café, que auxiliará no estudo e pode ser empregado para fins acadêmicos.

Palavras chave: Projeto, prototipagem, colhedora de café, vibração, deslocamentos .

DEVELOPING A SCALING COFFEE HARVEST FOR TESTING BENCH

ABSTRACT - *The coffee harvesters work with a vibration system to promote fruit loss. The vibration system is usually coupled to the end of an axis, called a rod vibrating cylinder. This cylinder may have field failures, which generally occur due to fracture in the contour of the rod cylinder, with an angle of approximately 45 °. It is observed, in the field, that this type of failure occurs in a short time, approximately from 1669h to 2496h of constant work of 8h per day, which requires diagnosis of failures. In this sense, this work has as main objective the development of a bench prototype for analysis of mechanical behavior of a coffee harvester, which will assist in the study and can be used for academic purposes.*

Keywords: Design, prototyping, coffee harvester, vibration, displacements.

¹ Professor Universidade Federal de Lavras.

² Doutorando em Engenharia Agrícola da Universidade Federal de Lavras.

³ Mestrando em Engenharia de Sistemas e Automação da Universidade Federal de Lavras.



INTRODUÇÃO

De acordo com a Organização das Nações Unidas (ONU) para a Agricultura e Alimentação (AYERS; WESTCOT, 1999), o crescimento da produção agrícola, nos últimos 50 anos, foi superior ao crescimento da população. No setor agrícola, vários estudos relacionam a análise de desempenho estatísticos da produção agrícola e os indicadores de fome no mundo. Está sendo experimentada, na agricultura, uma metodologia de Qualidade das Operações de Preparo de Solo por Controle Estatístico de Processo que, inicialmente, era utilizada somente nas indústrias (MILAN; FERNANDES, 2002).

A mecanização agrícola em grande escala ocorreu, a partir da utilização de máquinas e colhedoras empregadas na agricultura, após a segunda guerra mundial. A colheita do café, até pouco tempo atrás, era realizada manualmente ou de forma semimecanizada. A colheita manual pode danificar a lavoura, se comparada com a colheita mecanizada, além da baixa produtividade para a realidade Brasileira. Com o desenvolvimento tecnológico ocorrido nos últimos tempos, foi possível desenvolver tratores e colhedoras de grande porte. Com isso, máquinas que realizam derriça do fruto de café são cada vez mais comuns. Elas, porém, trabalham em uma determinada faixa de frequência de vibração, para atingir valores de ressonância do pedúnculo do fruto de café. Isso provoca a derriça do fruto, mais o impacto com as varetas (MAGALHÃES et al., 2000).

O objetivo principal deste trabalho foi estruturar e conceber uma colhedora de café para ser empregada em uma bancada de testes de deformações e vibrações.

As principais contribuições desse trabalho são a documentar de uma colhedora de café em escala, o desenvolvimento de um sistema para análise de colhedora de café e um sistema que poderá ser empregado na agricultura familiar com as devidas adaptações.

MAETERIAIS E MÉTODO

O projeto para o desenvolvimento de um maquinario agrícola contém seqüências que podem ser separados nas etapas de planejamento do projeto, projeto informativo, conceitual, preliminar e detalhado (MOREIRA; et al., 2016).

Planejamento do Projeto

Essa fase inicial constituiu-se como a delimitação da equipe e averiguação da demanda nos laboratórios da Universidade Federal de Lavras, por um equipamento em escala. Uma vez que o produto já é existente no mercado. O planejamento consistiu em definir uma equipe de projeto composta por dois professores, um aluno de doutorado e dois de mestrado, que seriam os responsáveis de iniciar as atividades.

Projeto informativo

Por intermédio de estudos de falhas na base do cilindro vibrador da colhedora de café, onde observou-se dificuldades no momento da aquisição dos dados em campo e padronização dos resultados. Foi iniciado a fase a qual visa buscar os princípios de funcionamento da colhedora. Pesquisando, detalhando e averiguando os componentes e suas funcionalidades no contexto de colheita como um todo.

Colhedora de café

Para produzir café de boa qualidade e ser competitivo no mercado. Os produtores rurais tem que cumprir com suas obrigações, com mão de obra de boa



qualidade, direitos trabalhista, adubação, correção do PH do solo, defensivos agrícolas, capina químicas e irrigação. Isto implica um elevado custo no produto final. Foi pensando nisso que um empresario da metal mecânica que também produz café em sua pequena propriedade, resolveu fabricar uma colhedora de café para pequenos produtores (Figura 1).

Figura 1 - Colhedora de Café.



Fonte: Do autor (2019).

Este tipo de colhedora de café é tracionada por um trator, em que o trator fica ao lado da colhedora. É o trator que transmite força motriz a colhedora de café. Por ser uma máquina de baixo valor aquisitivo, este tipo de colhedora possui um só cilindro de varetas. O cilindro de varetas atua

sobre a planta e promove a colheita por meio de vibrações. Estas vibrações vem do sistema mecânico localizado na parte inferior da colhedora.

Projeto conceitual

Após o procedimento de coletar as informações do equipamento, foi relacionado todos os requisitos aos quais o equipamento estará sujeito e seriam necessários para replicar os testes em bancada, assim como a redução em escala do equipamento. Estes requisitos foram ponderados pela equipe de desenvolvimento, e aderiu-se ao projeto uma pontuação para cada mecanismo.

Projeto preliminar

Gerado em conjunto com as informações dos passos anteriores, o projeto preliminar foi desenvolvido de uma maneira simples, usando apenas rascunhos. Esta definição serviu para a compreensão de todas as partes estruturais, o entendimento das interações existentes entre cada componentes e para uma melhor construção visual dos mecanismos.

Projeto da colhedora

Assim na fase final de projeto, com base na colhedora real, foi desenvolvido um projeto em escala reduzida (1:3), para tanto, coletou-se todas as dimensões de uma máquina real, visto que a colhedora de café não possui projeto disponível no cliente final, tão pouco na empresa fabricante. Assim, para coletar as todas as dimensões necessárias e a construção do protótipo, foram utilizados vários instrumentos de medição, dentre eles: paquímetro, goniômetro e trena. As dimensões principais do equipamento em escala coletados estão descritas na Tabela 1.

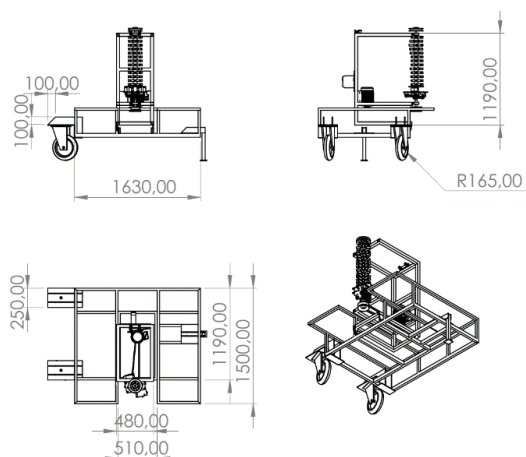
Tabela 1- Descrição da colhedora de café em escala.

| Colhedora de café em escala 1:3 | |
|---------------------------------------|---------|
| Altura máxima | 1650 mm |
| Largura | 1190 mm |
| comprimento | 1630 mm |
| Diâmetro de rodas | 330 mm |
| Comprimento assento | 420 mm |
| Tubo estrutural principal | |
| Largura horizontal | 30 mm |
| Largura vertical | 50 mm |
| Espessura | 3 mm |
| Tubo estrutural suporte eixo vibrador | |
| Largura horizontal (diâmetro) | 50 mm |
| Largura vertical | 80 mm |
| Espessura | 3 mm |

Um sistema de movimentação do sistema de colheita, permitiu que a colhedora fique alinhada com as árvores quando utilizada em declives. Isso foi fornecido montando um sistema articulado nas extremidades dos componentes de vibração e colheita, que foram articulados nas barras verticais da armação e posicionados e fixados com travantes.

Desse modo, utilizando todas as medidas principais coletadas, foi possível desenvolver o projeto apresentado na Figura 2.

Figura 2- Projeto em escala 1:3 da colhedora de café.



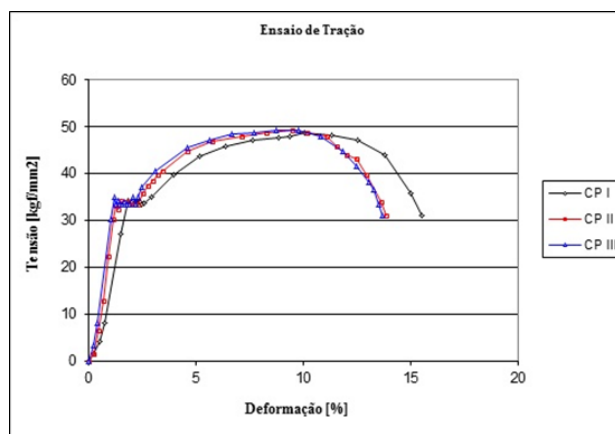
Fonte: Do autor (2019).

Já o sistema de aquisição de dados proposto detecta deformações no equipamento e vibrações.

Sistema de aquisição de dados de deformação

Quando um corpo sofre ação de uma força qualquer externa, o mesmo se deforma. Em condições normais, o material em deformação permanece no regime elástico, ou seja, região linear elástica. O gráfico tensão-deformação descreve esse comportamento dos materiais metálicos em geral. Nesse caso, a extensometria tem contribuído para a medição dessas deformações. Um gráfico tensão-deformação, como exemplo, contendo a parte linear elástica e a deformação plástica é apresentado na Figura 3.

Figura 3- Gráfico tensão-deformação.



Fonte: SILVA e BRACARENSE (2003).

Um dos sensores mais utilizados para medir deformação de um material é o extensômetro, conhecido por Strain Gauge. O Strain Gauge é fabricado em material com certa resistência elétrica. Esse material é produzido por um fino filamento metálico sobre um material isolante, geralmente epoxi, conforme Figura 4.

Figura 4 - Exemplos de Strain Gauges.



Strain Gauge Linear

Strain Gauge de Roseta

Fonte: Catálogo do fabricante Excel Sensores

Esse sensor é colado na superfície do material que, ao se deformar, varia a resistência elétrica do filamento, conforme Equação 1.

$$R = \rho \cdot \frac{L}{A} \quad (1)$$

Em que: R é a resistência elétrica em Ω ;

ρ é a resistividade do material;

L e o comprimento do filamento em m;

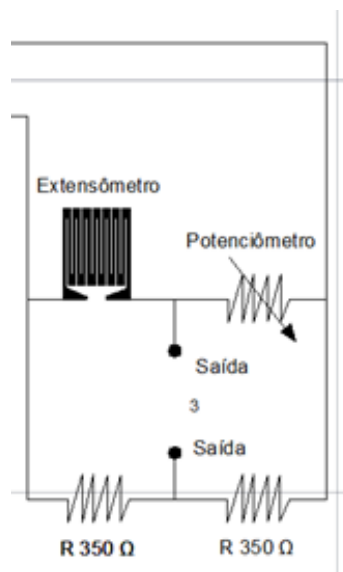
e A é a área da seção transversal do filamento em m^2 .

Geralmente, os extensômetros são inseridos no circuito eletrônico, por meio de pontes de Wheatstone. A ligação de uma ponte de Wheatstone com os extensômetros converte a resistência elétrica em sinal de tensão elétrica, que pode ser aferida, de acordo com a força aplicada no material.

Calibração da ponte de Wheatstone

Para realizar as leituras de deformações, foi confeccionada uma placa eletrônica contendo uma ponte de Wheatstone a fim de alimentar o extensômetro, no intuito de registrar os dados de deformação no material, conforme Figura 5.

Figura 5 - Esquemas de configurações das Pontes de Wheatstone



Fonte: Do autor (2019).

Com a utilização do multímetro Fluke 115 TRUE RMS realizou-se o ajuste da ponte de Wheatstone, até que a tensão equivalente nas saídas seja zero, regulada pelo potenciômetro. Isso foi realizado com extensômetro sem deformação no material.

A preparação consiste na fase principal do procedimento de calibração e deverá seguir um procedimento rigoroso para a obtenção de resultados replicáveis. Assim os materiais utilizados para a calibração e colagem dos extensômetros estão listados na Tabela 2, para que seja possível replicar todos os procedimentos aqui especificados e a reutilização em outros equipamentos.

O processo de colagem de um extensômetro consiste inicialmente na preparação da superfície para a remoção de resíduos e imperfeições da área de posicionamento do transdutor, afim de se evitar que causem interferências no procedimento de aquisição dos dados, para isso foram usados uma lixa média de numeração 100 na fase inicial do processo para remover as imperfeições superficiais do material, após isso utilizou-se a lixa 320 para retiras os riscos ocasionados



pela lixa 100 e para finalizar utilizou-se a lixa 600 para acabamento da superfície, em uma fase subsequente empregou-se álcool e a gaze para limpeza química.

Após a fase de limpeza, iniciou-se o procedimento de marcação e alinhamento do local de posicionamento do extensômetro essa fase foi desenvolvida com o auxílio de um traçador de altura, uma base magnética e um riscador de ponta fixa. Esta marcação está localizada no centro da viga metálica a uma distância de 122mm da extremidade de aplicação da carga. Terminando a

fase de marcação, deu início a fase de colagem do extensômetro. Nesta etapa foi cortado um pedaço de 5 cm da fita adesiva (durex), e com o auxílio da pinça o extensômetro foi pego por uma das bordas sem tocar no circuito, e foi posicionado sobre a fita com a parte superior do extensômetro, de modo que ficasse preso. Pegou-se, então, a fita isolante de comprimento superior a 50 mm, e colocou a sua parte superior sobre a fita adesiva do lado da cola. Para isolar os filamentos do extensômetro. Ficando assim as colas das fitas voltadas para a chapa. Deixou-se a fita de cabeça para baixo.

Tabela 2 - Lista de materiais para colagem extensômetros e funcionalidades.

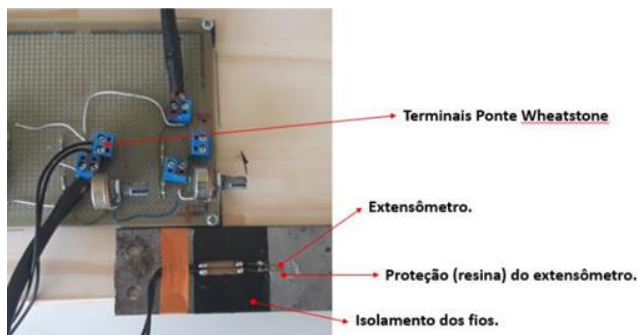
| Material | Quantidade | Unidade | Função |
|--|------------|---------|---|
| Strain Gauge Excel Sensor, modelo PA-06-060BA-350-LL | 2 | Unidade | Extensômetro |
| Viga Metálica | 1 | Unidade | Corpo de Prova |
| Lixa 100 | 1 | Unidade | Abrasão física preliminar |
| Lixa 320 | 1 | Unidade | Abrasão física intermediária |
| Lixa 600 | 1 | Unidade | Abrasão física de acabamento |
| Álcool isopropílico | 1/2 | Litro | Limpeza |
| Gazes | 1 | Caixa | Limpeza |
| Tesoura | 1 | Unidade | Auxílio para colagem e manuseio dos materiais |
| Traçador de altura | 1 | Unidade | Marcação do posicionamento do <i>strain gauge</i> |
| Riscador de ponta fixa metal duro | 1 | Unidade | Marcação do posicionamento do <i>strain gauge</i> |
| Pinça | 1 | Unidade | Auxílio manuseio dos extensômetros |
| Fita adesiva 48 mm | 1 | Rolo | Posicionamento dos extensômetros |
| Fita isolante | 1 | Rolo | Isolar fios do extensômetro em relação a viga |
| Resina Plástica | 1 | tubos | Proteger extensômetros |
| Espátula | 1 | Unidade | Manuseio da resina plástica |

A última fase do processo de colagem do extensômetro consiste na fixação do extensômetro e o isolamento dos fios. iniciou-se o processo da fase depositando cola sobre viga (super bond) em toda a área de contato do extensômetro. Após isso, o conjunto de fitas e extensômetro foi posicionada sobre a cola super bond. Foi mantida a pressão sobre o extensômetro por 2 minutos. Em seguida iniciou-se a retirada do adesivo (durex) e averiguou-se se não

havia irregularidades como bolhas ou posicionamento errôneo e probabilidade de curto-circuito. Após a colagem do extensômetro foi feito o teste de resistência elétrica, com multímetro FUUKE 115, o que constatou 350Ω. Então foi aplicada uma camada de silicone para proteção do extensômetro e seu filamento. Após esse processo, as pontas dos filamentos foram conectados aos terminais da ponte de Wheatstone conforme Figura 6



Figura 6 - Ligação do extensômetro à Ponte de Wheatstone.

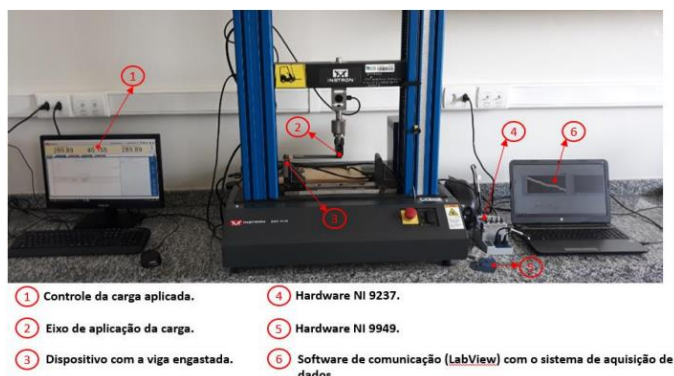


Fonte: Do autor (2019).

Foi utilizados os hardwares NI 9237 e NI 9949 da National Instruments que serve para o condicionamento de sinal necessário e alimentar e medir até quatro sensores baseados na ponte simultaneamente. O software que foi usado para a comunicação com os hardwares é o LabView especificamente a versão 16.0f2. A configuração dos hardwares e do software foi feita conforme indicação do manual do fabricante que estabelece um quarto de ponte de Wheatstone.

Durante o experimento coletou-se os valores de deformação específica por meio da leitura do extensômetro para cada carga aplicada à viga. Conforme pode ser observado na Figura 4, o setup do experimento consiste na montagem do dispositivo de engaste da viga logo abaixo do eixo de aplicação da carga, de modo que, a carga seja aplicada na extremidade da viga. O controle da carga aplicada foi feito por intermédio do software da máquina de ensaio. A coleta de dados foi realizada por meio do software de comunicação (LabView) e dos hardwares NI 9237 e NI 9949 especificado anteriormente.

Figura 7 - Setup experimento de calibração



Fonte: Do autor (2019).

Foram realizados cinco vezes o experimento, de modo que, cada vez utilizou-se de um ranger de 10 à 70N com intervalo entre as leitoras de 10 N, coletando-se as leituras médias encontradas e a cada medição realizada, optou-se por fazer o procedimento de calibração do extensômetro disponível no software LabView.

Sistema de aquisição de dados de vibração

Todas as máquinas rotativas apresentam um determinado nível de vibrações, que nem sempre pode-se caracterizar como defeito mecânico. Atualmente, muitas máquinas agrícolas atuam exercendo atividades vibratórias, para realizar determinada atividade, a exemplo da colheita mecanizada do café. É importante salientar que, na manutenção mecânica, de uma maneira geral, já se tem monitoramento de máquinas em tempo real. Dessa forma, qualquer anomalia que possa ocorrer, seja por defeito mecânico ou excitações secundárias, pode agravar. Nesse ponto de vista, a alteração do comportamento vibratório pode ser indício de um defeito, que pode ser, por empenamento, desalinhamento ou desbalanceamento, provocando desgaste e reduzindo a vida útil do equipamento (SOUZA; CICOONA; CHIQUITO, 2007). A análise das frequências envolvidas no processo vibratório de

uma máquina é idealizada, por meio de uma função matemática desenvolvida pelo físico e matemático francês Jean Baptiste Fourier (1768 – 1830). A transformada de Fourier (JOSEPH, 1822), aplicada a um sinal que se desenvolve no tempo, faz sua transposição para o domínio da frequência. Essa transformação possibilita a identificação dos diversos componentes de frequência de um sinal, como informações precisas quanto aos valores individuais de amplitude e de possíveis defasagens entre elas. A transformada de Fourier, para sinais contínuos que se desenvolvem desde $-\infty$ até $+\infty$, na forma complexa, é dada pela Equação 2, e a Equação \ref{eq4} é uma parte desta equação.

$$X(\omega) = \int_{-\infty}^{+\infty} x(t)e^{-i\omega t} dt \quad (2)$$

Em que $X(\omega)$ é uma função complexa da frequência (Hz) em que a Transformada de Fourier de $x(t)$, seja absolutamente integrável.

A visualização do espectro de frequência é importante para a análise de vibração em equipamentos rotativos. Isso possibilita associar as componentes de frequência e sua amplitude aos componentes mecânicos do equipamento, dando subsídio para o diagnóstico das causas da vibração. Por meio de métodos computacionais, foi desenvolvida a Transformada Discreta de Fourier, que trabalha com o sinal no domínio do tempo na forma discreta. A agilidade dos cálculos possibilitou o desenvolvimento de analisadores de sinais portáteis equipados com a Transformada Rápida de Fourier (FFT). É, a partir dessa técnica que, sinais provenientes de amostras no domínio do tempo, podem ser convertidas para o espectro de frequências, composto de valores distintos (MESQUITA et al., 2002).

Os conceitos sobre a teoria da vibração já são conhecidos há décadas, no entanto, só foram

utilizados em equipamentos mecânicos, com o desenvolvimento dos equipamentos eletrônicos mais sofisticados. As pesquisas tiveram um grande avanço, a partir do uso da análise de sinais e geração de dados, o que facilitou o entendimento de como as vibrações se comportam. Esse fato permitiu a execução da manutenção com custos decrescentes e com baixas ocorrências de falhas repentinas de equipamentos (MESQUITA et al., 2002).

Com o desenvolvimento da manutenção preditiva, no final dos anos 70, houve uma evolução da análise de vibrações, no intuito de acompanhar as condições operacionais dos equipamentos mecânicos. Pela popularização da análise de vibração, como técnicas empregadas em manutenção industrial, facilitou-se o surgimento dos primeiros coletores portáteis de vibrações (MESQUITA et al., 2002).

Com a entrada desses equipamentos elétricos e eletrônicos, abriu-se um caminho para a aplicação de novas tecnologia, as quais vêm sendo difundidas nas mais diversas linhas de pesquisa, é a aplicação de redes neurais e inteligências artificiais no fenômeno de vibração.

A observação do nível de vibração, ao longo do tempo, permite identificar quando a intensidade de vibração, taxa de repetição de um determinado fenômeno, suavidade ou rapidez com que as mudanças de direção e sentido ocorrem. A ocorrência de alterações, na forma, original do sinal, pode indicar o início de um mecanismo de falha no equipamento (MESQUITA et al., 2002).

Segundo Bloch (2006) e Wanzeler et al. (2013), as observações da indústria dos Estados Unidos da América, no monitoramento de turbo geradores, identificam que os limites de alarme praticados com base na experiência das equipes de manutenção, tendem

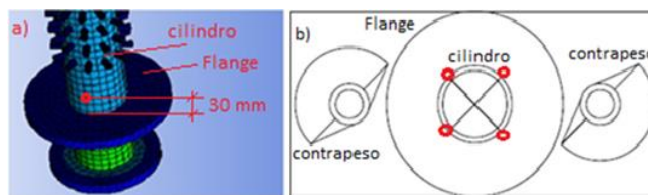


a ser mais conservativos que o padrão internacional estipulado pela norma (KUEMMLEE; GROSS; KOLERUS, 2013) (ISO 7919, 2009). Costa; Mathias (2011) apresentaram o sinal de vibração, ao longo do tempo de um rolamento com defeitos pré-determinados.

Segundo Almeida, Abrahão e Tereso (2015) e Santos (2008), a vibração para o ser humano pode lhe trazer danos fisiológicos que agridem os músculos, a respiração e aspecto fisiológicos no trabalho. Visto que, em níveis mais elevados, traz desconforto visual e psicomotor, danos aos tendões, juntas e ossos. As vibrações, portanto, constituem tanto um benefício assim como um malefício, mas faz-se necessário encontrar um meio termo e utilizar as vibrações para o bem-estar do operador e em benefício das máquinas.

Assim para a coleta de dados de deformação, foram utilizados três extensômetros unidirecionais no cilindro de varetas, sendo um na vertical outro na horizontal, e um terceiro a 45° distantes de 30 mm da região soldada entre cilindro e flange maior. O local determinado para a colagem do extensômetro foi definido em função da posição de início da trinca, ocorrida no material em estudo (o cilindro fraturado). Foram identificadas quatro posições ideais para a colagem dos extensômetros no cilindro, equidistantes em ângulos de 90°, conforme Figura 8 - b). Estas posições coincidem com os vértices formados pela a chapa do sistema de vibração com o tubo vibrador. Porém, foi utilizado somente um dos pontos, em que foi realizado o processo de colagem do extensômetro na posição horizontal, conforme Figura 8 - a).

Figura 8 - As quatro posições críticas para a colagem do extensômetro no cilindro.



Fonte: Do autor (2019).

Processo de fabricação de máquinas agrícolas

As máquinas agrícolas são fabricadas, normalmente, em aço carbono, conforme Normas SAE (Society of Automotive Engineers), ou ASTM (American Society for Testing and Materials), similar ao SAE 1010 ou ASTM A36, com raras exceções apresentam alguns elementos de liga. Esses materiais são usinados e soldados com pouco ou nenhum controle de qualidade. A conformidade entre o projeto e o processo de fabricação visa a garantir a qualidade do produto final, o que pode comprometer a funcionalidade das máquinas agrícolas.

A conformidade entre o projeto e o processo de fabricação visa a garantir a qualidade do produto final, principalmente quando soldagem e vibração, em conjunto, estão envolvidos no processo, o que pode comprometer a funcionalidade das máquinas agrícolas. Ainda, conforme Silva e Bracarense (2003), vibrações não são benéficas para equipamentos soldados, assim, faz-se necessário o acompanhamento de um profissional de soldagem com conhecimentos avançados em materiais e processos de soldagem.

A utilização de elementos de liga nos aços, aumenta a dureza do material, consequentemente, sua resistência mecânica. Porém, esses elementos de liga podem deixar o material susceptível a trincas. Apesar de ser uma maneira rápida de avaliar a soldagem de um aço, alguns fatores também devem ser considerados, como a espessura elevada do material a

ser soldado e o aporte térmico (energia térmica imposta pelo processo de soldagem).

Prototipagem

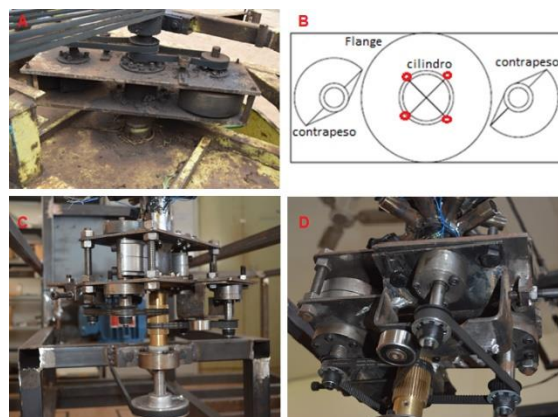
O protótipo da colhedora de café foi construído no laboratório do CEFET - Nepomuceno e instrumentada no laboratório da Engenharia de Controle e Automação da UFLA. A grande diferença da colhedora de produção em relação ao protótipo está no mecanismo que aciona o sistema mecânico. Na colhedora de produção encontra-se um multiplicador de velocidade, enquanto no protótipo o sistema mecânico é acionado por um motor elétrico de um CV (Cavalo). O controle da colhedora de produção está no torque do trator e no protótipo, utilizou-se um inversor de frequência. Este inversor de frequência possibilitou a regulação das três frequências de trabalho da colhedora em campo (12,5 Hz, 14,2 Hz e 15,8 Hz). Deste modo, 20 Hz no inversor de frequência foi equivalente a 12,5 Hz no protótipo da colhedora, 23 Hz no inversor de frequência foi equivalente a 14,2 Hz no protótipo da colhedora e 25 Hz no inversor de frequência foi equivalente a 15,8 Hz no protótipo da colhedora.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Sistema mecânico

O sistema mecânico está acoplado ao eixo do cilindro de varetas (Figura 9). Este sistema mecânico é fabricado a partir de duas chapas (superior e inferior) de aço SAE 1020, as quais têm dimensões de 750 mm de comprimento, 400 mm de largura e 15 mm de espessura. A figura mostra os dois sistemas mecânicos, A e B é o da colhedora e o C e D é o do protótipo.

Figura 9 - Sistema mecânico das duas colhedoras de Café.



Fonte: Do autor (2019).

Cada chapa é furada no centro com um diâmetro de 260 mm para o flange maior, e a segunda com diâmetro de 160 mm para o flange menor, com a finalidade de promover a fixação do sistema mecânico no cilindro de varetas por meio de 20 parafusos de 15 mm de diâmetro cada. Equidistante a esses dois furos centrais, há quatro outros furos de diâmetros de 55 mm, que servem para fixar os eixos dos dois contrapesos de 25 kg cada. Nas quatro extremidades das duas chapas, são fixados 4 parafusos espaçadores, com 200 mm de comprimento e 30 mm de diâmetro, cada um. Estes quatro parafusos, também chamados de haste, trabalham com quatro porcas em cada haste, para promover o afastamento das duas chapas e mantê-las fixas.

Nota-se que as duas chapas são montadas de tal forma que, entre elas, ficam alojados dois contrapesos, um em cada eixo motriz. Estes dois eixos são ligados ao eixo do cilindro vibrador por meio de duas correias dentadas.

O conjunto eixo do cilindro vibrador é um sistema mecânico composto por dois rolamentos e um eixo central que recebe as duas correias dentadas dos eixos dos contrapesos. O mancal deste eixo é soldado em um flange. Este flange é ligado ao tubo vibrador pelo seu flange de menor diâmetro (160 mm) por meio de

10 parafusos de 15 mm de diâmetro cada. A função deste eixo é girar constantemente durante o período de trabalho da colhedora. Outra função importante deste eixo é de deixar o cilindro de varetas livre, podendo se movimentar tanto para a direita quanto para a esquerda. Este eixo loco recebe transmissão de uma caixa multiplicadora 3 para 1.

A tomada de força do trator transmite movimento por meio de um eixo cardan, para a caixa multiplicadora e ao sistema mecânico. O sistema mecânico recebe o giro do trator por meio do eixo motriz e todo o sistema mecânico vibra. Este fenômeno de vibração é transmitido para o cilindro de varetas. O funcionamento deste sistema promove a colheita dos frutos de café. É importante que os dois contrapesos mantêm o sincronismo de funcionamento do sistema. Caso os contrapesos percam o sincronismo, a vibração do cilindro fica fora de controle, podendo danificar a máquina.

O protótipo final desenvolvido em escala está representado na Figura 10, que facilitará sua aplicabilidade em experimentos de bancada, didática. E aperfeiçoamento da técnica das colhedoras de café.

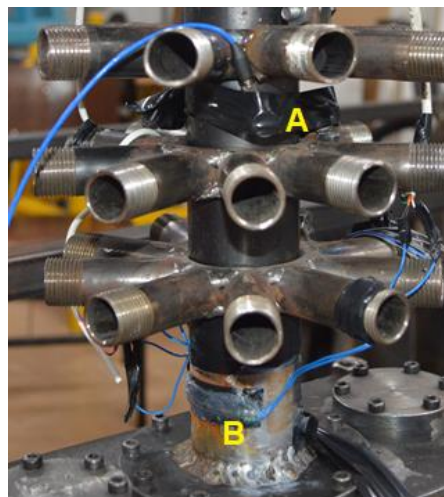
Figura 10 - Protótipo em escala.



Fonte: Do autor (2019).

Após calibração e ajustes de todo o sistema de aquisição, foi realizada a coleta dos dados de aceleração e deformações do cilindro vibrador de varetas no protótipo da colhedora. Foram realizados testes 1x1x3x3, ou seja, uma regulagem de freio (12 kgf), uma posição de acelerômetro (entre a base das varetas, conforme Figura 11), três posições de extensômetros na base do cilindro (horizontal, a 45° e vertical) e três frequências de vibração, atingindo assim um total de 9 eventos obtendo resultados conforme tabela.

Figura 11 - Coleta de dados com acelerômetro e extensômetro.



A - Acelerômetro
B - Extensômetro

Fonte: Do autor (2019).

Tabela 3 Frequencia obtida na Colhedora

| Frequência Inversor (Hz) | Replica 1 | Replica 1 | Replica 1 | Média |
|--------------------------|-----------|-----------|-----------|-------|
| 15,8 | 15,5 | 15,7 | 15,9 | 15,7 |
| 14,2 | 14,3 | 14,2 | 14,2 | 14,2 |
| 12,5 | 12,3 | 12,6 | 12,5 | 12,5 |

Os resultados obtidos estão bem próximos da frequência de panha do café conforme Ferreira Júnior (2016), ocasionando uma réplica similar ao modelo usado em seu estudo.

protótipo, esta na redução dos gastos e obtenção de resultados confiáveis.

CONCLUSÃO

A análise feita no protótipo em relação a vibração do acelerômetro, constatou que, o protótipo reproduziu exatamente as vibrações da colhedora de produção. O que garante um trabalho mais sofisticado quando se implementa o protótipo.

O extensômetro de número 2 foi o mais solicitado em relação aos extensômetros 1 e 3 que estava atuando na horizontal e vertical respectivamente. O extensômetro 2 estava colado a 45° exatamente no sentido da trica que foi encontrado no cilindro vibrador da colhedora de café de produção. Os valores experimentais foram compatíveis com a simulação numérica.

O protótipo construído CEFET-MG Nepomuceno Centro Federal de Educação

Tecnológica de Minas Gerais foi instrumentado na UFLA Universidade Federal de Lavras, no laboratório de Engenharia de Controle e Automação vai agora prestar uma grande contribuição para o desenvolvimento de novas pesquisas na área de mecanização agrícola.

A grande vantagem de se trabalhar com

LITERATURA CITADA

ALMEIDA, S. F.; ABRAHÃO, R. F.; TERESO, M. J. A. Avaliação da exposição ocupacional à vibração de corpo inteiro em máquinas de colheita florestal. **CERNE, Universidade Federal de Lavras, v. 21, n. 1, 2015.**

AYERS, R.; WESTCOT, D. Fao—organização das nações unidas para a agricultura e alimentação a qualidade da água na agricultura. **Campina Grande PB: UFPB, 1999.**

COSTA, C. da; MATHIAS, M. H. Instrumento de análise e diagnóstico em máquinas rotativas de indução. **Sinergia, v. 12, n. 2, p. 181–189, 2011.**

FERREIRA JÚNIOR, Luiz de Gonzaga et al. Recomendação para colheita mecânica do café baseado no comportamento de vibração das hastes derriçadoras. **Ciência Rural, v. 46, n. 2, p. 273-278, 2016.**

ISO 7919 -1, Mechanical vibration of non-reciprocating machines — Measurements on rotating shafts and evaluation criteria — Part 1: General guidelines, 2009.

JOSEPH, B. Fourier. **Theorie analytique de la chaleur, Paris, 1822.**

MESQUITA, A. L. et al. Detecção de falhas em rolamentos usando transformadas tempofrequência-



comparação com análise de envelope. **Mecânica Computacional**, v. 21, p. 1938–1954, 2002.

MILAN, M.; FERNANDES, R. A. T. Qualidade das operações de preparo de solo por controle estatístico de processo. **Scientia Agrícola, SciELO Brasil**, v. 59, n. 2, p. 261–266, 2002.

MOREIRA, RMG, TEIXEIRA, MM, SANTOS, FL, FERNANDES, HC, & CECON, PR (2016). Projeto preliminar de uma colheitadeira de café. Semina: **Ciências Agrárias** , 37 (5), 2933-2946.

MOREIRA, Raphael Magalhães Gomes et al. Projeto preliminar de uma colheitadeira de café. Semina: **Ciências Agrárias** , v. 37, n. 5, p. 2933-2946, 2016.

SILVA, C. A.; BRACARENSE, A. Q. Procedimento de soldagem para preparação de equipamentos de aço carbono exposto a grande quantidade de hidrogênio. **Soldagem & Inspeção**, v. 4, p. 179–186, 2003.

SOUZA, M. G. D.; CICOGNA, T. R.; CHIQUITO, A. J. Excitação dos modos normais de um sistema usando um motor desbalanceado. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v. 29, n. 1, p. 5–10, 2007.

WANZELER, C. d. V. et al. Uso da manutenção preditiva para análise de técnicas e detecção de falhas nos hidrogeradores da uhe de tucuruí. **2013**.

KUEMMLEE, H.; GROSS, T.; KOLERUS, J. Machine vibrations and diagnostics the world of iso. In: IEEE. **Industry Applications Society 60th Annual Petroleum and Chemical Industry Conference**. [S.l.], 2013. p. 1–1.



APÊNDICE A – Relatórios de análises

Relatório de análises SENAI - LAMAT utilizados no desenvolvimento da Tese.

**SENAI FIEMG****Laboratório de Ensaios e Análises em Materiais - LAMAT**Acreditado pela Coordenação Geral de Acreditação - CGCRE
Accredited by General Coordination for Accreditation - CGCREEnsaios
NBR ISO/IEC
17025

CRL 0126

Análise Química por Espectrometria Ótica - Base Ferro

Chemical Analysis by Optical Spectrometry - Iron Base

Relatório / Report nº 10367/2018

Solicitante / Requester: CARLOS ADEMIR DA SILVA
Endereço / Address: AV. MONSENHOR LUIZ DE GONZAGA 103 - CENTRO - NEPOMUCENO - MG
Material / Material: Amostra para análise
Identificação do Cliente / Identification by customer: Material do Flange

| Elementos <i>Elements</i> | Concentração <i>Concentration</i> | Unidade <i>Unit</i> |
|------------------------------|--------------------------------------|------------------------|
| Carbono (C) | 0,2066 | % |
| Silício (Si) | 0,1737 | % |
| Manganês (Mn) | 1,1518 | % |
| Fósforo (P) | 0,0220 | % |
| Enxofre (S) | 0,0072 | % |
| Cromo (Cr) | 0,0188 | % |
| Molibdênio (Mo) | 0,0063 | % |
| Níquel (Ni) | ND | % |
| Alumínio (Al Total) | 0,0391 | % |
| Cobalto (Co) | 0,0012 | % |
| Cobre (Cu) | 0,0047 | % |
| Nióbio (Nb) | 0,0331 | % |
| Titânio (Ti) | 0,0148 | % |
| Vanádio (V) | 0,0019 | % |
| Tungstênio (W) | ND | % |

| Elementos <i>Elements</i> | Concentração <i>Concentration</i> | Unidade <i>Unit</i> |
|------------------------------|--------------------------------------|------------------------|
| Chumbo (Pb) | 0,0012 | % |
| Estanho (Sn) | 0,0020 | % |
| Arsênio (As) | 0,0066 | % |
| Zircônio (Zr) | ND | % |
| Bismuto (Bi) | ND | % |
| Cálcio (Ca) | ND | % |
| Cério (Ce) | ND | % |
| Antimônio (Sb) | ND | % |
| Selênio (Se) | ND | % |
| Tântalo (Ta) | ND | % |
| Boro (B) | ND | % |
| Zinco (Zn) | ND | % |
| Lantânio (La) | ND | % |
| Nitrogênio (N) | 0,0064 | % |
| Ferro (Fe) Balanço | 98,2823 | % |

Este relatório contém resultados que se referem exclusivamente à amostra enviada pelo solicitante e somente deve ser reproduzido por completo, sendo que a reprodução de partes requer aprovação

This report contain results referred exclusively specimen sent by requester and should only be full reproduced, and the reproductions of parts requires written approval of the LAMAT.

Informações / Informations:

* **Temperatura máxima do laboratório: 28°C** / *Maximum Temperature of laboratory: 28°C.*

Procedimento / Método / *Procedure / Method:*

* **Análise realizada segundo Instrução Técnica IT Lab 249 revisão 09** / *Analyses performed by technical instruction IT Lab 249 revision 09.*

* **Normas: ASTM E 415:2017, ASTM E 1086:2014 e ASTM A 751:2014** / *Standards: ASTM E 415:2017, ASTM E 1086:2014 e ASTM A 751:2014.*

Observações / Observations:

O equipamento analisa somente os elementos apresentados no quadro deste relatório. A base refere-se ao balanceamento da composição para cem por cento podendo conter outros elementos não detectados / *The equipment only analyzes the elements presented in the chart of this report. The base refers to the balance of the composition for hundred percent and may contain other undetected elements.*

* **Onde consta ND (Não Detectado), significa que o resultado do elemento está abaixo do limite inferior da faixa de detecção do equipamento e NQ (Não Quantificado) está acima do limite superior da faixa de detecção do equipamento** / *Where reported ND (Not Detected), the result means that the element is below the lower limit of the detection range of equipment and NQ (Not Quantified) is above the upper limit of the detection range of the equipment.*

SENAI Itaúna CETEF Marcelino Corradi

Rua Lília Antunes, 99 - Bairro: Nogueira Machado - CEP: 35680-270

Itaúna - MG - Fone: (37) 3249-2400

Página 1 de 2

Relatório / Report nº 10367/2018

Equipamento utilizado / Equipment used:

* Método utilizado - Espectrometria de Emissão Ótica / Method used - Optical emission spectrometry.

Equipamentos / Instrumentos / Equipment / Instruments:

* Espectrômetro de Emissão Ótica SPECTROMAXx identificação 159239, calibrado pelo fabricante /

Optical emission spectrometer Spectromaxx, identification 159239, calibrated by manufacturer.

| Incerteza de Medição / Measurement Uncertainty | | | |
|--|----------------------------|--|---|
| Elemento Element | +/- U 95% / Uncertainty | Fator de Abrangência Coverage factor (K) | Graus de Liberdade Degrees of freedom V eff |
| C | 0,0090 | 2,11 | 25,379 |
| Si | 0,0128 | 2 | infinito |
| Mn | 0,0023 | 2 | infinito |
| P | 0,0083 | 2 | infinito |
| S | 0,0019 | 2,06 | 39,464 |
| Cr | 0,0051 | 2,23 | 12,014 |
| Mo | 0,0101 | 2,25 | 11,678 |
| Ni | 0,0088 | 2,15 | 18,503 |
| Al t | 0,0032 | 2,05 | 57,907 |
| Co | 0,0032 | 2 | infinito |
| Cu | 0,0041 | 2,05 | 58,736 |
| Nb | 0,0063 | 2,14 | 19,18 |
| Ti | 0,0068 | 2,25 | 11,942 |
| V | 0,0025 | 2,16 | 17,034 |
| W | 0,0124 | 2 | infinito |
| Pb | 0,0007 | 2 | infinito |
| Sn | 0,0014 | 2,05 | 50,671 |
| As | 0,0056 | 2,2 | 14,54 |
| Zr | 0,0026 | 2,02 | 103,238 |
| Bi | 0,0006 | 2,13 | 42,46 |
| Ca | 0,0002 | 2 | infinito |
| Ce | 0,0002 | 2 | infinito |
| Sb | 0,0024 | 2 | infinito |
| Se | 0,0014 | 2,05 | 58,273 |
| Ta | 0,0042 | 2,15 | 18,171 |
| B | 0,0003 | 2,02 | 183,64 |
| Zn | 0,0002 | 2 | infinito |
| La | 0,0002 | 2,05 | 68,598 |
| N | 0,0019 | 2,11 | 23,62 |

* Esta foi a maior incerteza encontrada e foi obtida através da multiplicação da incerteza de medição combinada pelo fator de abrangência K (coeficiente de segurança), proporcionando um nível de confiança de aproximadamente de 95% / This is the bigger uncertainty found and was obtained through for multiplication for measurement uncertainty combined by the coverage factor K (safety factor), providing a level by safety approximately 95%.

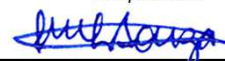
Recepção / Reception 20/09/18

Analista
Analyst

Responsável
Responsible

Realização / Achievement 24/09/18

Jorge Henrique Queiroz Ferreira
Laboratorista Técnico



Emissão / Emission 24/09/18

Patrícia Resende
Laboratorista-CRQ 02102194-2ºR

Responsável Técnico LAMAT: João Pousa Alves Filho, CREA-MG 0000168139D

Technical Responsible LAMAT: João Pousa Alves Filho, CREA-MG 0000168139D

**SENAI FIEMG****Laboratório de Ensaios e Análises em Materiais - LAMAT**Acreditado pela Coordenação Geral de Acreditação - CGCRE
Accredited by General Coordination for Accreditation - CGCREEnsaios
NBR ISO/IEC
17025

CRL 0126

Análise Química por Espectrometria Ótica - Base Ferro

Chemical Analysis by Optical Spectrometry - Iron Base

Relatório / Report nº 10371/2018

Solicitante / Requester: CARLOS ADEMIR DA SILVA
Endereço / Address: AV. MONSENHOR LUIZ DE GONZAGA 103 - CENTRO - NEPOMUCENO - MG
Material / Material: Amostra para análise
Identificação do Cliente / Identification by customer: Material do tubo

| Elementos <i>Elements</i> | Concentração <i>Concentration</i> | Unidade <i>Unit</i> |
|------------------------------|--------------------------------------|------------------------|
| Carbono (C) | 0,2113 | % |
| Silício (Si) | 0,1872 | % |
| Manganês (Mn) | 0,8446 | % |
| Fósforo (P) | 0,0162 | % |
| Enxofre (S) | 0,0075 | % |
| Cromo (Cr) | 0,0311 | % |
| Molibdênio (Mo) | 0,0096 | % |
| Níquel (Ni) | ND | % |
| Alumínio (Al Total) | 0,0234 | % |
| Cobalto (Co) | 0,0020 | % |
| Cobre (Cu) | 0,0014 | % |
| Nióbio (Nb) | ND | % |
| Titânio (Ti) | 0,0020 | % |
| Vanádio (V) | 0,0009 | % |
| Tungstênio (W) | ND | % |

| Elementos <i>Elements</i> | Concentração <i>Concentration</i> | Unidade <i>Unit</i> |
|------------------------------|--------------------------------------|------------------------|
| Chumbo (Pb) | ND | % |
| Estanho (Sn) | 0,0012 | % |
| Arsênio (As) | 0,0013 | % |
| Zircônio (Zr) | ND | % |
| Bismuto (Bi) | ND | % |
| Cálcio (Ca) | 0,0011 | % |
| Cério (Ce) | ND | % |
| Antimônio (Sb) | ND | % |
| Selênio (Se) | ND | % |
| Tântalo (Ta) | ND | % |
| Boro (B) | ND | % |
| Zinco (Zn) | ND | % |
| Lantânio (La) | ND | % |
| Nitrogênio (N) | 0,0046 | % |
| Ferro (Fe) Balanço | 98,6324 | % |

Este relatório contém resultados que se referem exclusivamente à amostra enviada pelo solicitante e somente deve ser reproduzido por completo, sendo que a reprodução de partes requer aprovação

This report contain results referred exclusively specimen sent by requester and should only be full reproduced, and the reproductions of parts requires written approval of the LAMAT.

Informações / Informations:

* **Temperatura máxima do laboratório: 28°C** / *Maximum Temperature of laboratory: 28°C.*

Procedimento / Método / *Procedure / Method:*

* **Análise realizada segundo Instrução Técnica IT Lab 249 revisão 09** / *Analyses performed by technical instruction IT Lab 249 revision 09.*

* **Normas: ASTM E 415:2017, ASTM E 1086:2014 e ASTM A 751:2014** / *Standards: ASTM E 415:2017, ASTM E 1086:2014 e ASTM A 751:2014.*

Observações / Observations:

O equipamento analisa somente os elementos apresentados no quadro deste relatório. A base refere-se ao balanceamento da composição para cem por cento podendo conter outros elementos não detectados / *The equipment only analyzes the elements presented in the chart of this report. The base refers to the balance of the composition for hundred percent and may contain other undetected elements.*

* **Onde consta ND (Não Detectado), significa que o resultado do elemento está abaixo do limite inferior da faixa de detecção do equipamento e NQ (Não Quantificado) está acima do limite superior da faixa de detecção do equipamento** / *Where reported ND (Not Detected), the result means that the element is below the lower limit of the detection range of equipment and NQ (Not Quantified) is above the upper limit of the detection range of the equipment.*

SENAI Itaúna CETEF Marcelino Corradi

Rua Lília Antunes, 99 - Bairro: Nogueira Machado - CEP: 35680-270

Itaúna - MG - Fone: (37) 3249-2400

Página 1 de 2

Relatório / Report nº 10371/2018

Equipamento utilizado / Equipment used:

* Método utilizado - Espectrometria de Emissão Ótica / Method used - Optical emission spectrometry.

Equipamentos / Instrumentos / Equipment / Instruments:

* Espectrômetro de Emissão Ótica SPECTROMAXx identificação 159239, calibrado pelo fabricante /

Optical emission spectrometer Spectromaxx, identification 159239, calibrated by manufacturer.

| Incerteza de Medição / Measurement Uncertainty | | | |
|--|----------------------------|--|---|
| Elemento Element | +/- U 95% / Uncertainty | Fator de Abrangência Coverage factor (K) | Graus de Liberdade Degrees of freedom V eff |
| C | 0,0090 | 2,11 | 25,379 |
| Si | 0,0128 | 2 | infinito |
| Mn | 0,0023 | 2 | infinito |
| P | 0,0083 | 2 | infinito |
| S | 0,0019 | 2,06 | 39,464 |
| Cr | 0,0051 | 2,23 | 12,014 |
| Mo | 0,0101 | 2,25 | 11,678 |
| Ni | 0,0088 | 2,15 | 18,503 |
| Al t | 0,0032 | 2,05 | 57,907 |
| Co | 0,0032 | 2 | infinito |
| Cu | 0,0041 | 2,05 | 58,736 |
| Nb | 0,0063 | 2,14 | 19,18 |
| Ti | 0,0068 | 2,25 | 11,942 |
| V | 0,0025 | 2,16 | 17,034 |
| W | 0,0124 | 2 | infinito |
| Pb | 0,0007 | 2 | infinito |
| Sn | 0,0014 | 2,05 | 50,671 |
| As | 0,0056 | 2,2 | 14,54 |
| Zr | 0,0026 | 2,02 | 103,238 |
| Bi | 0,0006 | 2,13 | 42,46 |
| Ca | 0,0002 | 2 | infinito |
| Ce | 0,0002 | 2 | infinito |
| Sb | 0,0024 | 2 | infinito |
| Se | 0,0014 | 2,05 | 58,273 |
| Ta | 0,0042 | 2,15 | 18,171 |
| B | 0,0003 | 2,02 | 183,64 |
| Zn | 0,0002 | 2 | infinito |
| La | 0,0002 | 2,05 | 68,598 |
| N | 0,0019 | 2,11 | 23,62 |

* Esta foi a maior incerteza encontrada e foi obtida através da multiplicação da incerteza de medição combinada pelo fator de abrangência K (coeficiente de segurança), proporcionando um nível de confiança de aproximadamente de 95% / This is the bigger uncertainty found and was obtained through for multiplication for measurement uncertainty combined by the coverage factor K (safety factor), providing a level by safety approximately 95%.


Recepção / Reception 20/09/18

Analista
Analyst

Responsável
Responsible

Realização / Achievement 27/09/18

Jorge Henrique Queiroz Ferreira
Laboratorista Técnico



Emissão / Emission 27/09/18

Patrícia Resende
Laboratorista-CRQ 02102194-2ºR

Responsável Técnico LAMAT: João Pousa Alves Filho, CREA-MG 0000168139D

Technical Responsible LAMAT: João Pousa Alves Filho, CREA-MG 0000168139D

**SENAI FIEMG****Laboratório de Ensaios e Análises em Materiais - LAMAT**

Acreditado pela Coordenação Geral de Acreditação - CGCRE

Accredited by General Coordination for Accreditation - CGCRE

Ensaios
NBR ISO/IEC
17025

CRL 0126

Análise Metalográfica em Aço

Metallographic Analysis in Steel

Relatório de Ensaio / Test Report Nº:10369/2018

Solicitante / Client: CARLOS ADEMIR DA SILVA
Endereço / Address: AV. MONSENHOR LUIZ DE GONZAGA 103 - CENTRO - NEPOMUCENO - MG
Material / Material: Amostra para análise
Identificação do Cliente Material do tubo
Client Identification:

Descrição / Description:

Aço

Estrutura constituída de:

- Perlita: 28% e Ferrita: 72%.
- Observa-se a presença de microtrincas em uma extremidade da amostra.
- Nota-se a presença de estrutura bandeada.
- Observa-se a presença de deformação plástica nas extremidades da amostra.
- Nota-se a presença de inclusões típicas de óxidos e sulfetos dispersas na seção examinada.

Temperatura do Ensaio 24,4 °C*test temperature:***Observações:**

Este relatório contém resultados que se referem exclusivamente à amostra enviada pelo solicitante e somente deve ser reproduzido por completo, sendo que a reprodução de partes requer aprovação escrita do LAMAT.

This report contain results refered exclusively specimens sent by requester and should only be full reproduced, and the reproductions of parts requires written approval of the LAMAT.

Informações / Informations:

- * Ensaio realizado com referência à norma ABNT NBR 15454:2007.
- * Equipamento utilizado: Microscópio Ótico GX51 OLYMPUS, nº 163645.

Recepção / Reception 20/09/18**Analista***Analyst***Responsável***Responsible***Realização / Achievement** 27/09/18

Dualas Fernando Lopes

Emissão / Emission 27/09/18

Laboratorista

Dualas Fernando Lopes
Laboratorista**Responsável Técnico LAMAT: João Pousa Alves Filho, CREA-MG 0000168139D***Technical Responsible LAMAT: João Pousa Alves Filho, CREA-MG 0000168139D***SENAI Itaúna CETEF Marcelino Corradi**

Rua Lilia Antunes, 99 - Bairro: Nogueira Machado - CEP: 35680-270

Itaúna - MG - Fone: (37) 3249-2400

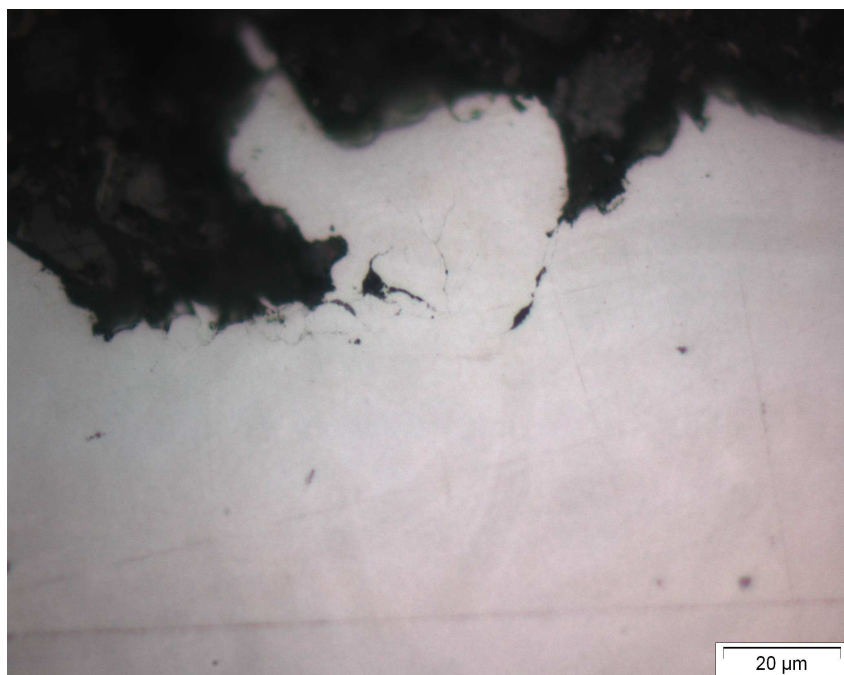
Página 1 de 6



Inclusões dispersas.

Reativo: Sem ataque.

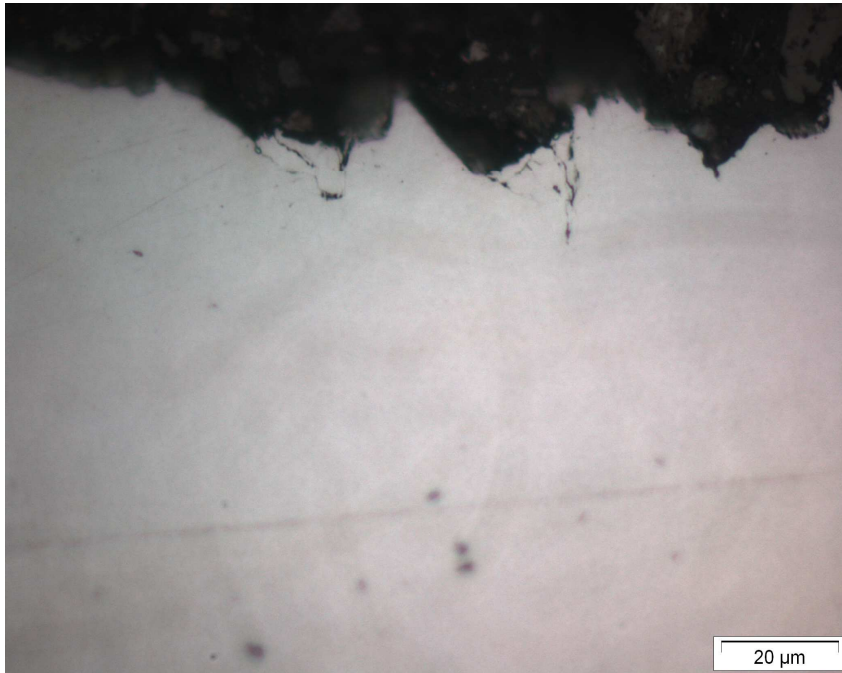
Ampliação: 100x.



Presença de microtrincas (Região 1).

Reativo: Sem ataque.

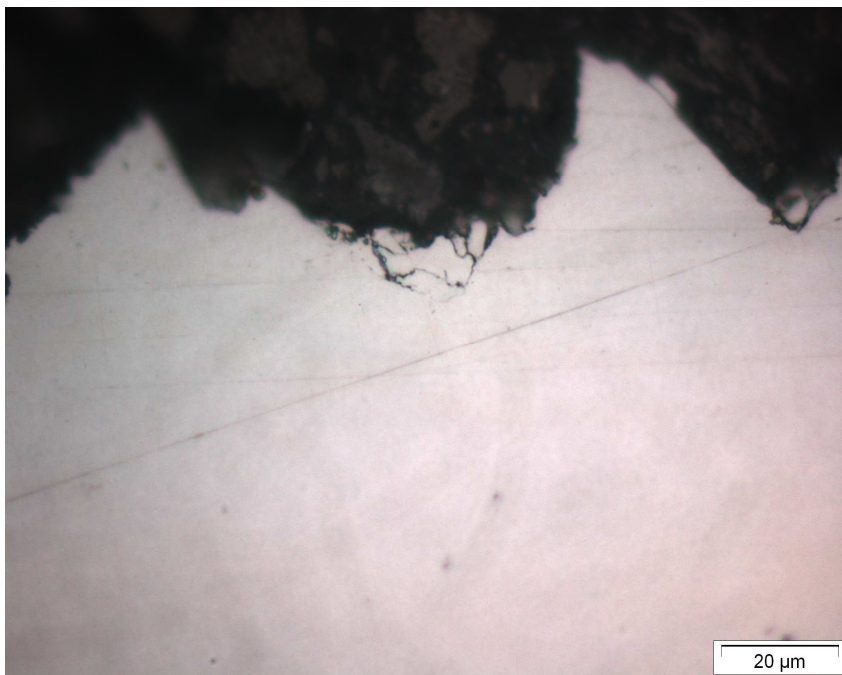
Ampliação: 1000x.



Presença de microtrincas (Região 2).

Reativo: Sem ataque.

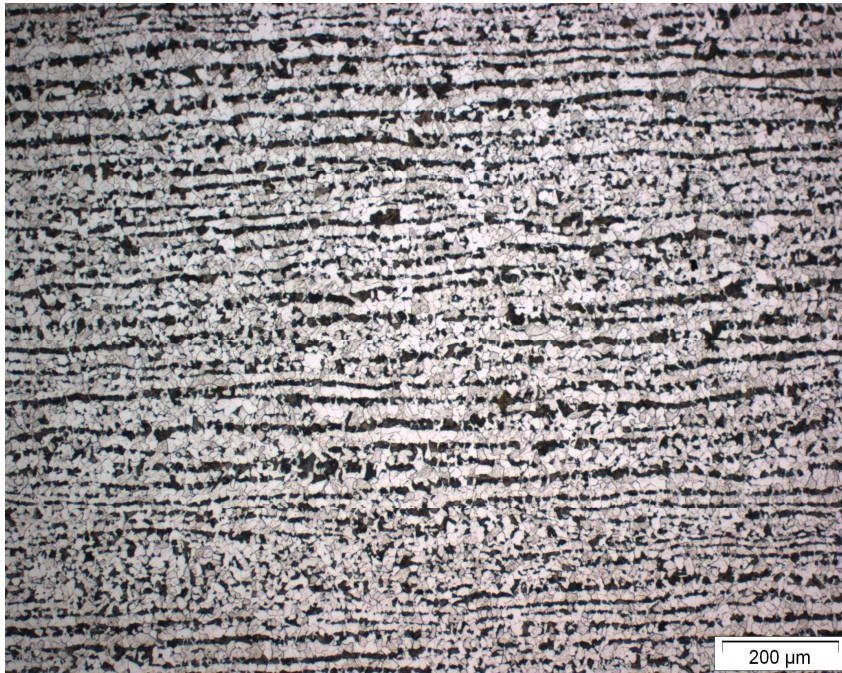
Ampliação: 1000x.



Presença de microtrincas (Região 3).

Reativo: Sem ataque.

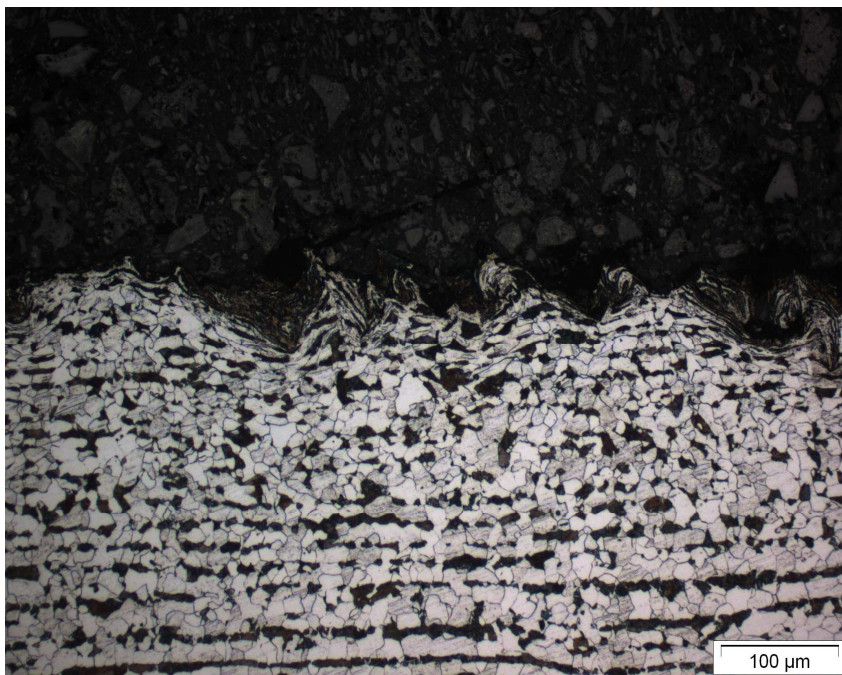
Ampliação: 1000x.



Ferrita e perlita (estrutura bandeada).

Reativo: Nital 2%.

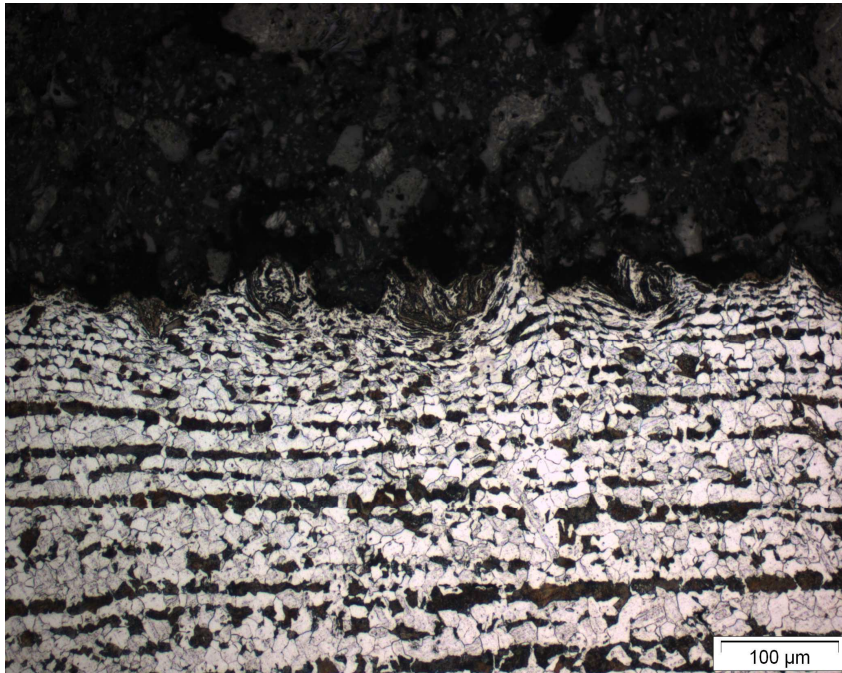
Ampliação: 100x.



Deformação plástica na extremidade da amostra.

Reativo: Nital 2%.

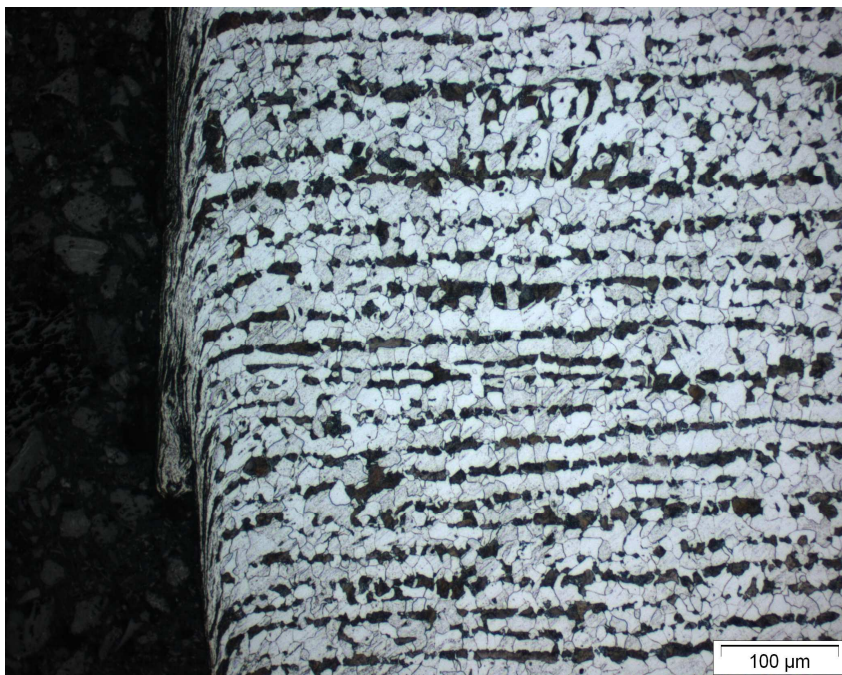
Ampliação: 200x.



Deformação plástica na extremidade da amostra.

Reativo: Nital 2%.

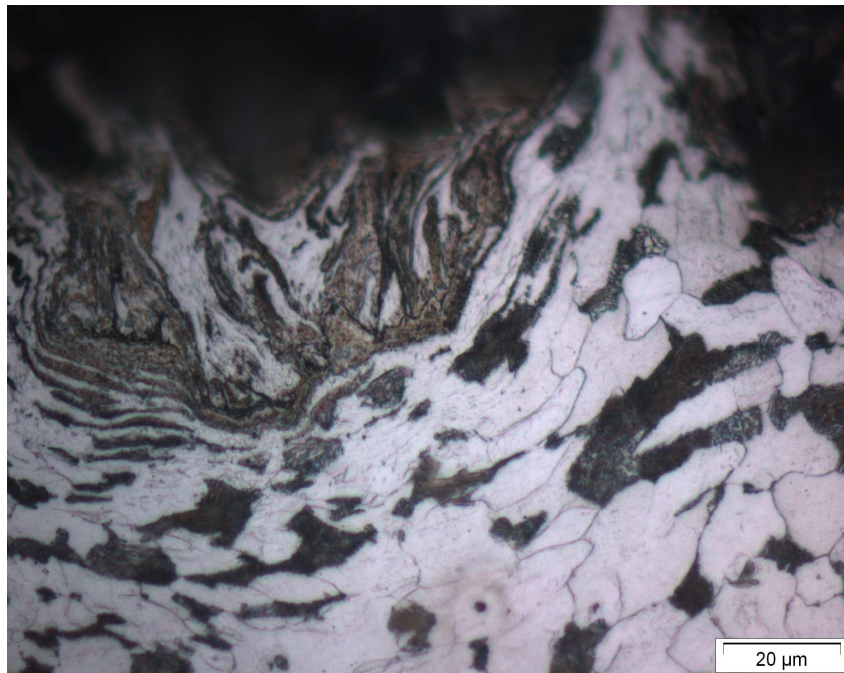
Ampliação: 200x.



Deformação plástica na extremidade da amostra.

Reativo: Nital 2%.

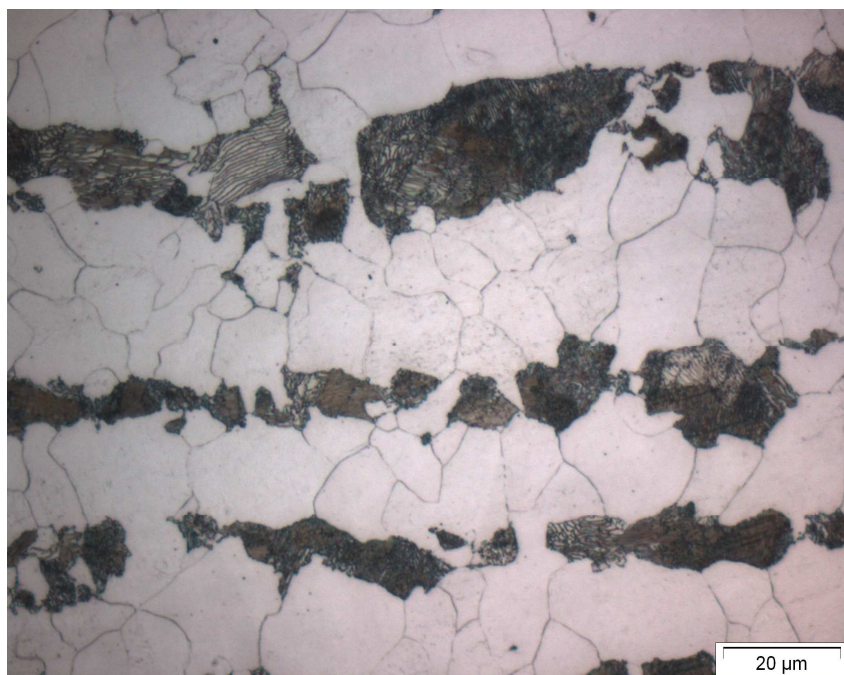
Ampliação: 200x.



Detalhe da deformação plástica.

Reativo: Nital 2%.

Ampliação: 1000x.



Detalhe dos grãos equiaxiais (Núcleo da amostra).

Reativo: Nital 2%.

Ampliação: 1000x.

**SENAI FIEMG****Laboratório de Ensaios e Análises em Materiais - LAMAT**Acreditado pela Coordenação Geral de Acreditação - CGCRE
Accredited by General Coordination for Accreditation - CGCREEnsaios
NBR ISO/IEC
17025**Relatório de Ensaios Mecânicos**
Mechanical Teste Report

CRL 0126

Relatório de Ensaio / Test Report Nº:10370/2018**Solicitante / Client:** CARLOS ADEMIR DA SILVA**Endereço / Address:** AV. MONSENHOR LUIZ DE GONZAGA 103 - CENTRO - NEPOMUCENO - MG**Material / Material:** Amostra para análise**Identificação do Cliente** Material do tubo*Client Identification:*

| Dureza Brinell / Brinell Hardness | | | | |
|--|-------------------------------------|--------------------------------|-----------------------------------|--|
| ENSAIO <i>TEST</i> | RESULTADOS <i>RESULTS</i> | UNIDADE <i>UNITY</i> | CARGA <i>LOAD (Kgf)</i> | PENETRADOR <i>INDENTER</i> Ø / mm |
| Valor 1 <i>Value 1</i> | 150,0 | HBW | 187,5 | 2,5 |
| Valor 2 <i>Value 2</i> | 149,0 | | | |
| Valor 3 <i>Value 3</i> | 151,0 | | | |
| Média / Average | 150,0 | | | |

Este relatório contém resultados que se referem exclusivamente à amostra enviada pelo solicitante e somente deve ser reproduzido por completo, sendo que a reprodução de partes requer aprovação escrita do LAMAT.*This report contain results referred exclusively specimen sent to requestor and only be reproduced in full, and that reproduction of parts requires written approval by LAMAT.***Observações do ensaio / Test Observation:****ND - Não determinado / ND - Not determined:****SENAI Itaúna CETEF Marcelino Corradi**

Rua Lília Antunes, 99 - Bairro: Nogueira Machado - CEP: 35680-270

Itaúna - MG - Fone: (37) 3249-2400

Página 1 de 2 / Page 1 of 2



Relatório de Ensaio / Test Report Nº:10370/2018

Equipamentos Utilizados / Used Equipment:

* Durômetro Universal Dura Vision DV30, identificação 219170, calibrado por laboratório pertencente à Rede Brasileira de Calibração - RBC.

* Termo-higrômetro Digital, identificação 203907, calibrado por laboratório pertencente à Rede Brasileira de Calibração - RBC.

* Termo-higrômetro Digital, identificação 764508, calibrado por laboratório pertencente à Rede Brasileira de Calibração - RBC.

*** Ensaio realizado conforme norma: ABNT NBR NM ISO 6506-1:2010 Errata 1:2010.**

Test performed according to Standard: ABNT NBR NM ISO 6506-1:2010 Errata 1:2010.

*** O ensaio foi realizado a temperatura ambiente 23,4 °C**

The test is performed in room temperature

23,4 °C

Recepção / Reception 20/09/18

Analista
Analyst

Responsável
Responsible

Realização / Achievement 21/09/18

Leandro Teles Fonseca
Laboratorista

Leandro Teles Fonseca

Emissão / Emission 21/09/18

Leandro Teles Fonseca
Laboratorista

Responsável Técnico LAMAT: João Pousa Alves Filho, CREA-MG 0000168139D

Technical Responsible LAMAT: João Pousa Alves Filho, CREA-MG 0000168139D

SENAI Itaúna CETEF Marcelino Corradi

Rua Lilia Antunes, 99 - Bairro: Nogueira Machado - CEP: 35680-270

Itaúna - MG - Fone: (37) 3249-2400

Página 2 de 2 / Page 2 of 2

**SENAI FIEMG****Laboratório de Ensaios e Análises em Materiais - LAMAT**

Acreditado pela Coordenação Geral de Acreditação - CGCRE

Accredited by General Coordination for Accreditation - CGCRE

Ensaios
NBR ISO/IEC
17025

CRL 0126

Relatório de Ensaios Mecânicos

Mechanical Teste Report

Relatório de Ensaio nº:10373/2018

Test Report nº:10373/2018

Solicitante / Client: CARLOS ADEMIR DA SILVA
Endereço / Address: AV. MONSENHOR LUIZ DE GONZAGA 103 - CENTRO - NEPOMUCENO - MG
Material / Material: Amostra para análise
Identificação do Cliente CP1

Client Identification:

| ENSAIO TEST | UNIDADE UNITY | RESULTADOS RESULTS |
|---|---------------------|-----------------------|
| Resistência à Tração (R_m) / Tensile Strength | kgf/mm ² | 52,4 |
| | MPa | 514,0 |
| Resistência de Prova, Extensão Plástica (R_p) - Limite de Escoamento / Proof Strength, Plastic Extension Yield Limit | kgf/mm ² | ND |
| | MPa | ND |
| Resistência ao Escoamento Superior (R_{eH}) Superior Yield Strength | kgf/mm ² | 35,7 |
| | MPa | 350,2 |
| Alongamento Percentual Após Ruptura (A) / Percentage of Elongation after rupture | % | 40,0 |
| Largura Width | mm | 6,32 |
| Espessura Thickness | mm | 8,25 |
| Força Máxima (F_m) Maximun Force | Kgf | 2734,0 |

Observações do ensaio / Test Observation:

ND - Não determinado / ND - Not determined

Resistência de Prova, Extensão Plástica (R_p)

Proof Strength, Plastic Extension

0,2 %

Resistência ao Escoamento Superior (R_{eH}) / Superior Yield Strength:

Nítido

Comprimento de Medida Original / Original Length Measure:

25,00 mm

SENAI Itaúna CETEF Marcelino Corradi

Rua Lilia Antunes, 99 - Bairro: Nogueira Machado - CEP: 35680-270

Itaúna - MG - Fone: (37) 3249-2400

Página 1 de 2 / Page 1 of 2

Relatório de Ensaio nº:10373/2018

Test Report nº:10373/2018

Este relatório contém resultados que se referem exclusivamente à amostra enviada pelo solicitante e somente deve ser reproduzido por completo, sendo que a reprodução de partes requer aprovação escrita do LAMAT.

This report contain results referred exclusively specimen sent to requestor and only be reproduced in full, and that reproduction of parts requires written approval by LAMAT.

Equipamentos Utilizados / Used Equipment:

- * Gerador de Força - Máquina Universal de Ensaio de Tração, identificação 59494, calibrado por laboratório pertencente à Rede Brasileira de Calibração - RBC.
- * Paquímetro, identificação 203829, calibrado por laboratório pertencente à Rede Brasileira de Calibração - RBC.
- * Paquímetro, identificação 203830, calibrado por laboratório pertencente à Rede Brasileira de Calibração - RBC.
- * Paquímetro, identificação 168156, calibrado por laboratório pertencente à Rede Brasileira de Calibração - RBC.
- * Paquímetro, identificação 203831, calibrado por laboratório pertencente à Rede Brasileira de Calibração - RBC.
- * Termo-higrômetro Digital, identificação 203907 e 764508, calibrado por laboratório pertencente à Rede Brasileira de Calibração - RBC.
- * Medidor de altura, identificação 182779, calibrado por laboratório pertencente à Rede Brasileira de Calibração - RBC.

*** Ensaio realizado conforme norma: ABNT NBR ISO 6892-1:2013, exceto 10.3, Errata 1:2015.**

Test performed according to Standard ABNT NBR ISO 6892-1:2013, except 10.3, Errata 1:2015.

*** O ensaio foi realizado a temperatura ambiente 24,5 °C**

The test is performed in room temperature

24,5 °C

Recepção / Reception 20/09/18

Realização / Achievement 25/09/18

Emissão / Emission 25/09/18

Analista
Analyst

Leandro Teles Fonseca
Laboratorista

Responsável
Responsible

Leandro Teles Fonseca
Laboratorista

Responsável Técnico LAMAT: João Pousa Alves Filho, CREA-MG 0000168139D

Technical Responsible LAMAT: João Pousa Alves Filho, CREA-MG 0000168139D

SENAI Itaúna CETEF Marcelino Corradi

Rua Lilia Antunes, 99 - Bairro: Nogueira Machado - CEP: 35680-270

Itaúna - MG - Fone: (37) 3249-2400

Página 2 de 2 / Page 2 of 2

**SENAI FIEMG****Laboratório de Ensaios e Análises em Materiais - LAMAT**

Acreditado pela Coordenação Geral de Acreditação - CGCRE

Accredited by General Coordination for Accreditation - CGCRE

Ensaios
NBR ISO/IEC
17025

CRL 0126

Relatório de Ensaios Mecânicos

Mechanical Teste Report

Relatório de Ensaio nº:10374/2018

Test Report nº:10374/2018

Solicitante / Client: CARLOS ADEMIR DA SILVA
Endereço / Address: AV. MONSENHOR LUIZ DE GONZAGA 103 - CENTRO - NEPOMUCENO - MG
Material / Material: Amostra para análise
Identificação do Cliente CP2

Client Identification:

| ENSAIO TEST | UNIDADE UNITY | RESULTADOS RESULTS |
|---|---------------------|-----------------------|
| Resistência à Tração (R_m) / Tensile Strength | kgf/mm ² | 53,4 |
| | MPa | 523,9 |
| Resistência de Prova, Extensão Plástica (R_p) - Limite de Escoamento / Proof Strength, Plastic Extension Yield Limit | kgf/mm ² | ND |
| | MPa | ND |
| Resistência ao Escoamento Superior (R_{eH}) Superior Yield Strength | kgf/mm ² | 35,1 |
| | MPa | 344,3 |
| Alongamento Percentual Após Ruptura (A) / Percentage of Elongation after rupture | % | 41,0 |
| Largura Width | mm | 6,32 |
| Espessura Thickness | mm | 8,25 |
| Força Máxima (F_m) Maximun Force | Kgf | 2784,0 |

Observações do ensaio / Test Observation:

ND - Não determinado / ND - Not determined

Resistência de Prova, Extensão Plástica (R_p)

Proof Strength, Plastic Extension

0,2 %

Resistência ao Escoamento Superior (R_{eH}) / Superior Yield Strength:

Nítido

Comprimento de Medida Original / Original Length Measure:

25,00 mm

SENAI Itaúna CETEF Marcelino Corradi

Rua Lilia Antunes, 99 - Bairro: Nogueira Machado - CEP: 35680-270

Itaúna - MG - Fone: (37) 3249-2400

Página 1 de 2 / Page 1 of 2

Relatório de Ensaio nº:10374/2018

Test Report nº:10374/2018

Este relatório contém resultados que se referem exclusivamente à amostra enviada pelo solicitante e somente deve ser reproduzido por completo, sendo que a reprodução de partes requer aprovação escrita do LAMAT.

This report contain results referred exclusively specimen sent to requestor and only be reproduced in full, and that reproduction of parts requires written approval by LAMAT.

Equipamentos Utilizados / Used Equipment:

- * Gerador de Força - Máquina Universal de Ensaio de Tração, identificação 59494, calibrado por laboratório pertencente à Rede Brasileira de Calibração - RBC.
- * Paquímetro, identificação 203829, calibrado por laboratório pertencente à Rede Brasileira de Calibração - RBC.
- * Paquímetro, identificação 203830, calibrado por laboratório pertencente à Rede Brasileira de Calibração - RBC.
- * Paquímetro, identificação 168156, calibrado por laboratório pertencente à Rede Brasileira de Calibração - RBC.
- * Paquímetro, identificação 203831, calibrado por laboratório pertencente à Rede Brasileira de Calibração - RBC.
- * Termo-higrômetro Digital, identificação 203907 e 764508, calibrado por laboratório pertencente à Rede Brasileira de Calibração - RBC.
- * Medidor de altura, identificação 182779, calibrado por laboratório pertencente à Rede Brasileira de Calibração - RBC.

*** Ensaio realizado conforme norma: ABNT NBR ISO 6892-1:2013, exceto 10.3, Errata 1:2015.**

Test performed according to Standard ABNT NBR ISO 6892-1:2013, except 10.3, Errata 1:2015.

*** O ensaio foi realizado a temperatura ambiente 24,5 °C**

The test is performed in room temperature

24,5 °C

Recepção / Reception 20/09/18

Analista
Analyst

Responsável
Responsible

Realização / Achievement 25/09/18

Leandro Teles Fonseca
Laboratorista


Leandro Teles Fonseca
Laboratorista

Emissão / Emission 25/09/18

Responsável Técnico LAMAT: João Pousa Alves Filho, CREA-MG 0000168139D

Technical Responsible LAMAT: João Pousa Alves Filho, CREA-MG 0000168139D

SENAI Itaúna CETEF Marcelino Corradi

Rua Lilia Antunes, 99 - Bairro: Nogueira Machado - CEP: 35680-270

Itaúna - MG - Fone: (37) 3249-2400

Página 2 de 2 / Page 2 of 2

**SENAI FIEMG****Laboratório de Ensaios e Análises em Materiais - LAMAT**

Acreditado pela Coordenação Geral de Acreditação - CGCRE

Accredited by General Coordination for Accreditation - CGCRE

Ensaios
NBR ISO/IEC
17025

CRL 0126

Relatório de Ensaios Mecânicos

Mechanical Teste Report

Relatório de Ensaio nº:10375/2018

Test Report nº:10375/2018

Solicitante / Client: CARLOS ADEMIR DA SILVA
Endereço / Address: AV. MONSENHOR LUIZ DE GONZAGA 103 - CENTRO - NEPOMUCENO - MG
Material / Material: Amostra para análise
Identificação do Cliente CP3

Client Identification:

| ENSAIO TEST | UNIDADE UNITY | RESULTADOS RESULTS |
|--|---------------------|-----------------------|
| Resistência à Tração (R_m) / Tensile Strength | kgf/mm ² | 53,3 |
| | MPa | 522,9 |
| Resistência de Prova, Extensão Plástica (R_p) - Limite de Escoamento / Proof Strength, Plastic Extension Yield Limit | kgf/mm ² | ND |
| | MPa | ND |
| Resistência ao Escoamento Superior (R_{eH}) Superior Yield Strength | kgf/mm ² | 34,5 |
| | MPa | 338,4 |
| Alongamento Percentual Após Ruptura (A) / Percentage of Elongation after rupture | % | 41,5 |
| Largura Width | mm | 6,32 |
| Espessura Thickness | mm | 8,25 |
| Força Máxima (F_m) Maximun Force | Kgf | 2778,0 |

Observações do ensaio / Test Observation:

ND - Não determinado / ND - Not determined

Resistência de Prova, Extensão Plástica (R_p)

Proof Strength, Plastic Extension

0,2 %

Resistência ao Escoamento Superior (R_{eH}) / Superior Yield Strength:

Nítido

Comprimento de Medida Original / Original Length Measure:

25,00 mm

SENAI Itaúna CETEF Marcelino Corradi

Rua Lilia Antunes, 99 - Bairro: Nogueira Machado - CEP: 35680-270

Itaúna - MG - Fone: (37) 3249-2400

Página 1 de 2 / Page 1 of 2

Relatório de Ensaio nº:10375/2018

Test Report nº:10375/2018

Este relatório contém resultados que se referem exclusivamente à amostra enviada pelo solicitante e somente deve ser reproduzido por completo, sendo que a reprodução de partes requer aprovação escrita do LAMAT.

This report contain results referred exclusively specimen sent to requestor and only be reproduced in full, and that reproduction of parts requires written approval by LAMAT.

Equipamentos Utilizados / Used Equipment:

- * Gerador de Força - Máquina Universal de Ensaio de Tração, identificação 59494, calibrado por laboratório pertencente à Rede Brasileira de Calibração - RBC.
- * Paquímetro, identificação 203829, calibrado por laboratório pertencente à Rede Brasileira de Calibração - RBC.
- * Paquímetro, identificação 203830, calibrado por laboratório pertencente à Rede Brasileira de Calibração - RBC.
- * Paquímetro, identificação 168156, calibrado por laboratório pertencente à Rede Brasileira de Calibração - RBC.
- * Paquímetro, identificação 203831, calibrado por laboratório pertencente à Rede Brasileira de Calibração - RBC.
- * Termo-higrômetro Digital, identificação 203907 e 764508, calibrado por laboratório pertencente à Rede Brasileira de Calibração - RBC.
- * Medidor de altura, identificação 182779, calibrado por laboratório pertencente à Rede Brasileira de Calibração - RBC.

*** Ensaio realizado conforme norma: ABNT NBR ISO 6892-1:2013, exceto 10.3, Errata 1:2015.**

Test performed according to Standard ABNT NBR ISO 6892-1:2013, except 10.3, Errata 1:2015.

*** O ensaio foi realizado a temperatura ambiente 24,5 °C**

The test is performed in room temperature

24,5 °C

Recepção / Reception 20/09/18

Analista
Analyst

Responsável
Responsible

Realização / Achievement 25/09/18

Leandro Teles Fonseca
Laboratorista


Leandro Teles Fonseca
Laboratorista

Emissão / Emission 25/09/18

Responsável Técnico LAMAT: João Pousa Alves Filho, CREA-MG 0000168139D

Technical Responsible LAMAT: João Pousa Alves Filho, CREA-MG 0000168139D

SENAI Itaúna CETEF Marcelino Corradi

Rua Lilia Antunes, 99 - Bairro: Nogueira Machado - CEP: 35680-270

Itaúna - MG - Fone: (37) 3249-2400

Página 2 de 2 / Page 2 of 2



Laboratório de Ensaios e Análises em Materiais - LAMAT

Relatório de Microscopia Eletrônica de Varredura

RELATÓRIO DE ANÁLISE N°: 10368/2018

Solicitante: CARLOS ADEMIR DA SILVA
Endereço: AV. MONSENHOR LUIZ DE GONZAGA 103 – CENTRO – NEPOMUCENO - MG
Material: Amostra para análise
Identificação do Cliente: Material do tubo

Estes resultados referem-se exclusivamente a(s) amostra(s) enviada(s) pelo solicitante

1 – Amostra


A amostra foi enviada pelo cliente com a identificação acima.

2 – Equipamentos

- Microscópio eletrônico por varredura – JEOL – JSM-6510LV.

3 – Parâmetros de Análise

A amostra foi embutida, fixada em um suporte metálico e inserida no porta amostras do microscópio. Foram realizadas imagens em algumas regiões da amostra, conforme solicitação do cliente.

| | | | |
|-------------------|------------|-------------------------------------|---|
| Recepção | 20/09/2018 | Analista | Responsável |
| Realização | 24/09/2018 | |  |
| Emissão | 24/09/2018 | Jean Chaves Araújo Laboratorista | Jean Chaves Araújo Laboratorista |

Responsável Técnico LAMAT: João Pousa Alves Filho, CREA-MG 0000168139D

SENAI Itaúna CETEF Marcelino Corradi
Rua Lilia Antunes, 99 - Bairro Nogueira Machado - CEP: 35680-270
Itaúna - MG - Fone: (37) 3249-2400
Página 1 de 5



Relatório de Microscopia Eletrônica de Varredura

RELATÓRIO DE ANÁLISE Nº: 10368/2018

4- Imagens

Foram registradas 06 imagens na região de interesse. Os parâmetros de análise encontram-se nas respectivas imagens.

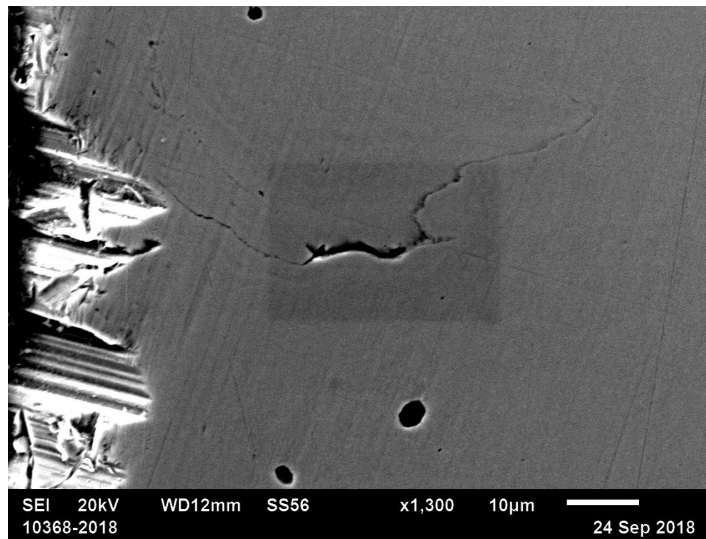


Figura 01: Ampliação: 1300X

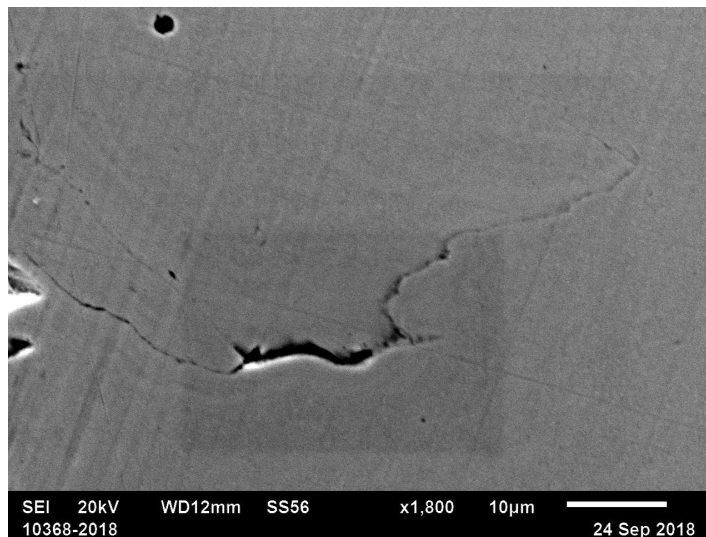



Figura 02: Ampliação: 1800X

| | | | |
|-------------------|------------|-------------------------------------|---|
| Recepção | 20/09/2018 | Analista | Responsável |
| Realização | 24/09/2018 | |  |
| Emissão | 24/09/2018 | Jean Chaves Araújo Laboratorista | Jean Chaves Araújo Laboratorista |

Responsável Técnico LAMAT: João Pousa Alves Filho, CREA-MG 0000168139D



Relatório de Microscopia Eletrônica de Varredura

RELATÓRIO DE ANÁLISE Nº: 10368/2018

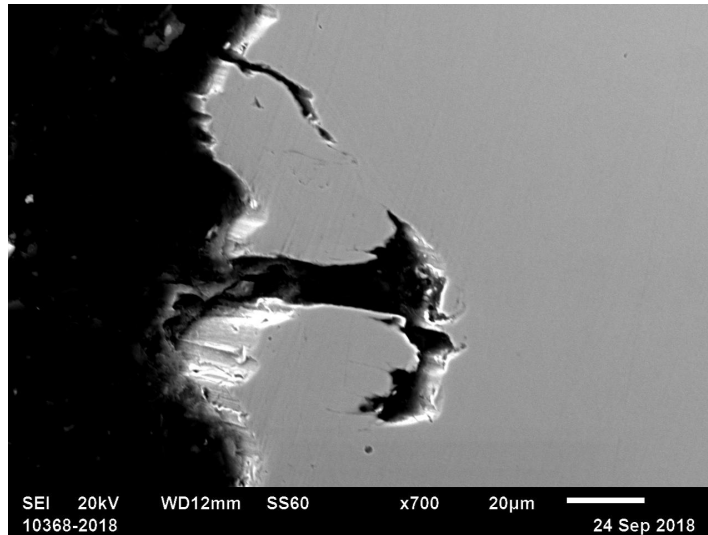


Figura 03: Ampliação: 700X

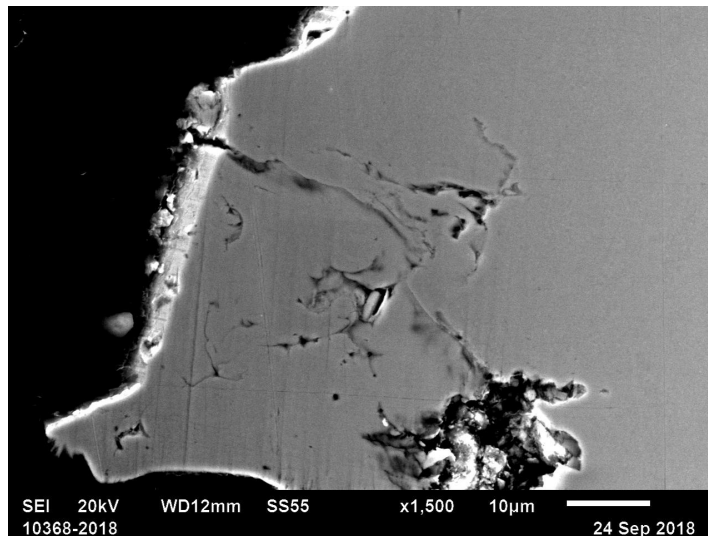



Figura 04: Ampliação: 1500X

| | | | |
|-------------------|------------|-------------------------------------|---|
| Recepção | 20/09/2018 | Analista | Responsável |
| Realização | 24/09/2018 | |  |
| Emissão | 24/09/2018 | Jean Chaves Araújo Laboratorista | Jean Chaves Araújo Laboratorista |

Responsável Técnico LAMAT: João Pousa Alves Filho, CREA-MG 0000168139D



Relatório de Microscopia Eletrônica de Varredura

RELATÓRIO DE ANÁLISE Nº: 10368/2018

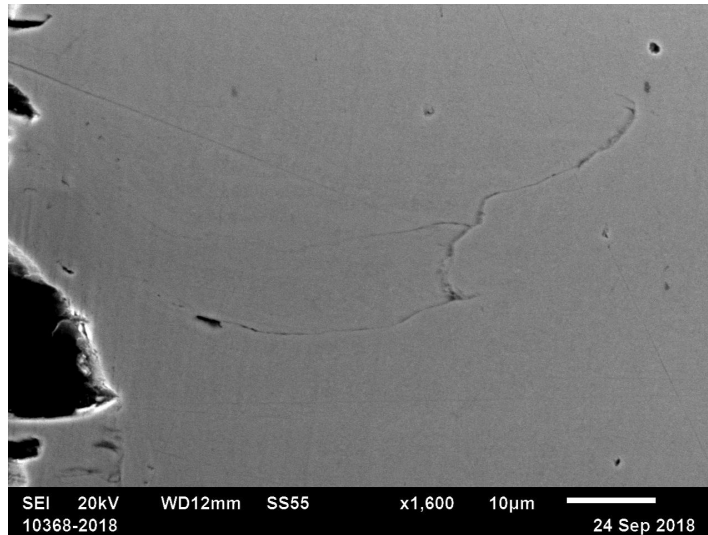


Figura 05: Ampliação: 1600X

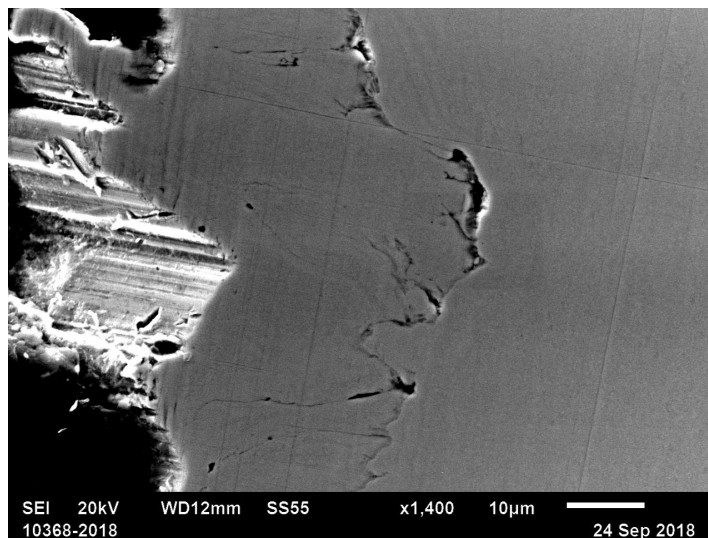



Figura 06: Ampliação: 1400X

| | | | |
|-------------------|------------|-------------------------------------|---|
| Recepção | 20/09/2018 | Analista | Responsável |
| Realização | 24/09/2018 | |  |
| Emissão | 24/09/2018 | Jean Chaves Araújo Laboratorista | Jean Chaves Araújo Laboratorista |

Responsável Técnico LAMAT: João Pousa Alves Filho, CREA-MG 0000168139D

SENAI Itaúna CETEF Marcelino Corradi
Rua Lilia Antunes, 99 - Bairro Nogueira Machado - CEP: 35680-270
Itaúna - MG - Fone: (37) 3249-2400
Página 4 de 5



SENAI FIEMG


Laboratório de Ensaios e Análises em Materiais - LAMAT

Relatório de Microscopia Eletrônica de Varredura

RELATÓRIO DE ANÁLISE N°: 10368/2018

5 Observações

- O Laboratório de MEV / EDS não emite parecer conclusivo sobre as amostras analisadas;

| | | | |
|-------------------|------------|-------------------------------------|---|
| Recepção | 20/09/2018 | Analista | Responsável |
| Realização | 24/09/2018 | |  |
| Emissão | 24/09/2018 | Jean Chaves Araújo Laboratorista | Jean Chaves Araújo Laboratorista |

Responsável Técnico LAMAT: João Pousa Alves Filho, CREA-MG 0000168139D

SENAI Itaúna CETEF Marcelino Corradi
Rua Lilia Antunes, 99 - Bairro Nogueira Machado - CEP: 35680-270
Itaúna - MG - Fone: (37) 3249-2400
Página 5 de 5



Relatório de Microscopia Eletrônica de Varredura

RELATÓRIO DE ANÁLISE Nº: 10372/2018

Solicitante: CARLOS ADEMIR DA SILVA
Endereço: AV. MONSENHOR LUIZ DE GONZAGA 103 – CENTRO – NEPOMUCENO - MG
Material: Amostra para análise
Identificação do Cliente: Fratura ocorrida no tubo.

Estes resultados referem-se exclusivamente a(s) amostra(s) enviada(s) pelo solicitante

1 – Amostra

A amostra foi enviada pelo cliente com a identificação acima.




Figura 01 – Amostra analisada

2 – Equipamentos

- Microscópio eletrônico por varredura – JEOL – JSM-6510LV.

3 – Parâmetros de Análise

A amostra foi fixada em um suporte metálico e inserida no porta amostras do microscópio. Foram realizadas imagens em algumas regiões da amostra, conforme solicitação do cliente.

| | | | |
|-------------------|------------|-------------------------------------|---|
| Recepção | 20/09/2018 | Analista | Responsável |
| Realização | 25/09/2018 | |  |
| Emissão | 25/09/2018 | Jean Chaves Araújo Laboratorista | Jean Chaves Araújo Laboratorista |

Responsável Técnico LAMAT: João Pousa Alves Filho, CREA-MG 0000168139D

SENAI Itaúna CETEF Marcelino Corradi
Rua Lilia Antunes, 99 - Bairro Nogueira Machado - CEP: 35680-270
Itaúna - MG - Fone: (37) 3249-2400
Página 1 de 6



Relatório de Microscopia Eletrônica de Varredura

RELATÓRIO DE ANÁLISE N°: 10372/2018

4- Imagens

Foram registradas 08 imagens nas regiões de interesse. Os parâmetros de análise encontram-se nas respectivas imagens.

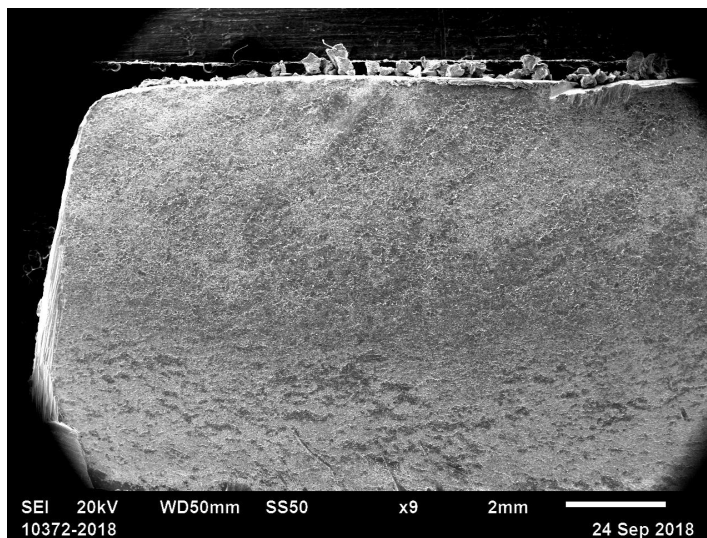


Figura 02: Região 01 - Ampliação: 9X

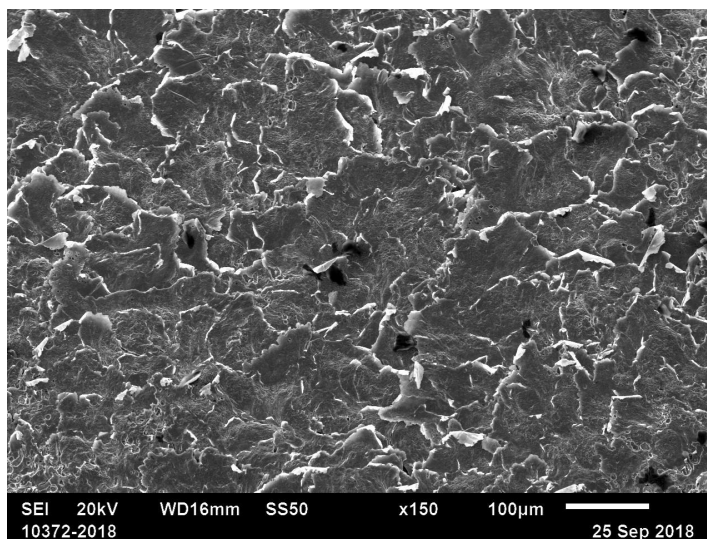



Figura 03: Região 01 - Ampliação: 150X

| | | | |
|-------------------|------------|-------------------------------------|---|
| Recepção | 20/09/2018 | Analista | Responsável |
| Realização | 25/09/2018 | |  |
| Emissão | 25/09/2018 | Jean Chaves Araújo Laboratorista | Jean Chaves Araújo Laboratorista |

Responsável Técnico LAMAT: João Pousa Alves Filho, CREA-MG 0000168139D



Relatório de Microscopia Eletrônica de Varredura

RELATÓRIO DE ANÁLISE N°: 10372/2018

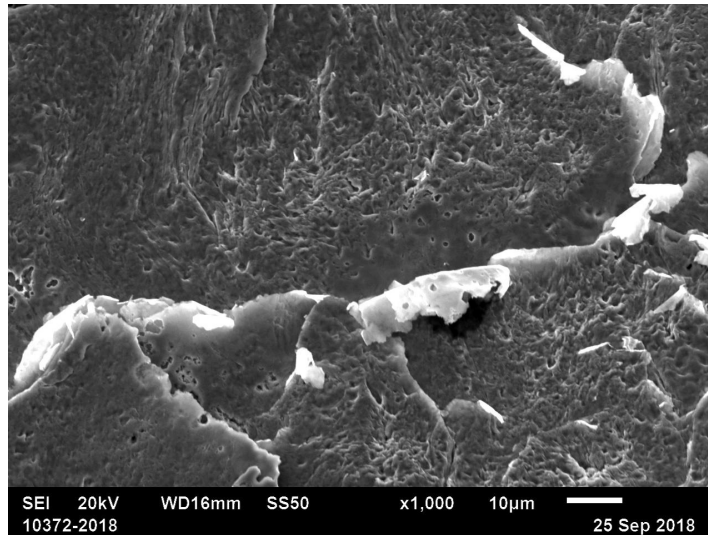


Figura 04: Região 01 - Ampliação: 1000X

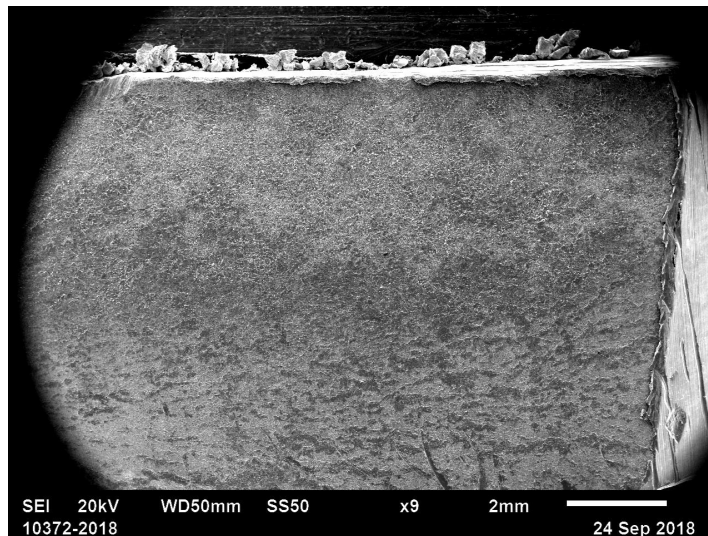



Figura 05: Região 02 - Ampliação: 9X

| | | | |
|-------------------|------------|-------------------------------------|---|
| Recepção | 20/09/2018 | Analista | Responsável |
| Realização | 25/09/2018 | |  |
| Emissão | 25/09/2018 | Jean Chaves Araújo Laboratorista | Jean Chaves Araújo Laboratorista |

Responsável Técnico LAMAT: João Pousa Alves Filho, CREA-MG 0000168139D



Relatório de Microscopia Eletrônica de Varredura

RELATÓRIO DE ANÁLISE Nº: 10372/2018

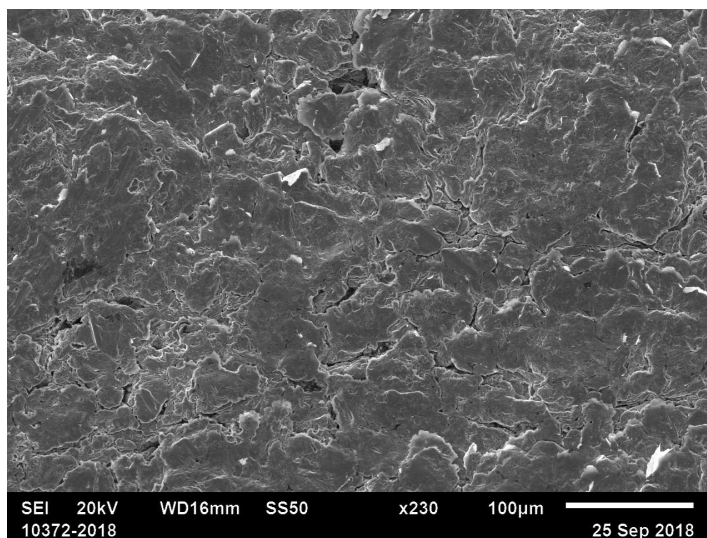


Figura 06: Região 02 - Ampliação: 230X

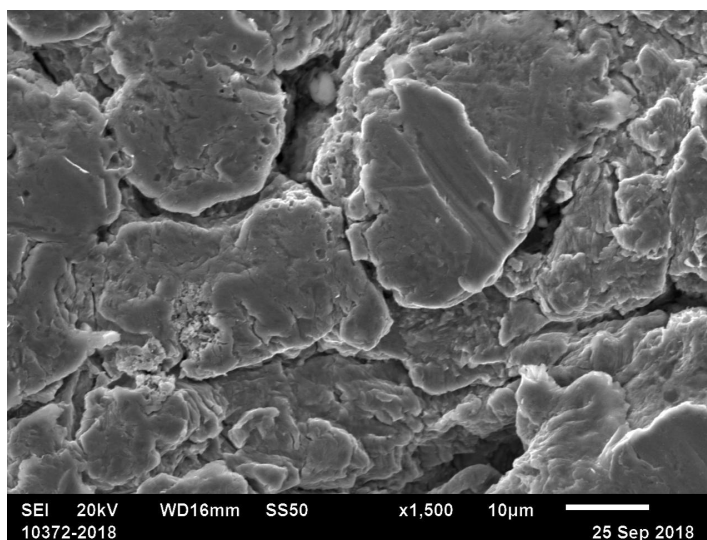



Figura 07: Região 02 - Ampliação: 1500X

| | | | |
|-------------------|------------|-------------------------------------|---|
| Recepção | 20/09/2018 | Analista | Responsável |
| Realização | 25/09/2018 | |  |
| Emissão | 25/09/2018 | Jean Chaves Araújo Laboratorista | Jean Chaves Araújo Laboratorista |

Responsável Técnico LAMAT: João Pousa Alves Filho, CREA-MG 0000168139D



Relatório de Microscopia Eletrônica de Varredura

RELATÓRIO DE ANÁLISE Nº: 10372/2018

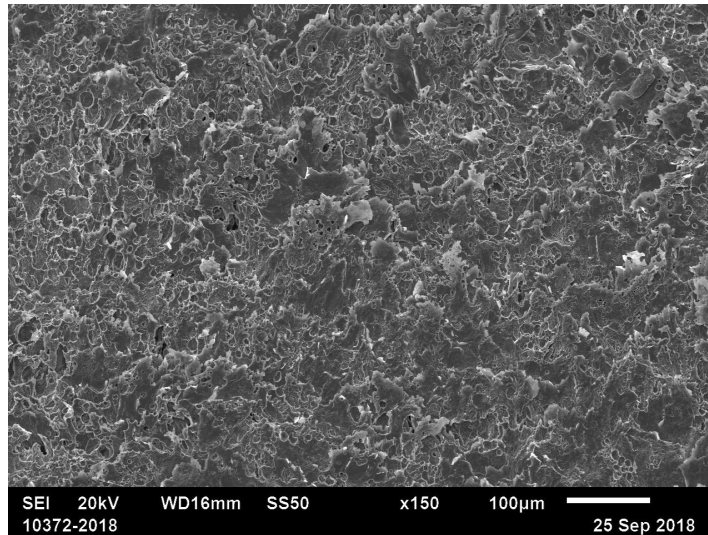


Figura 08: Região 02 - Ampliação: 150X

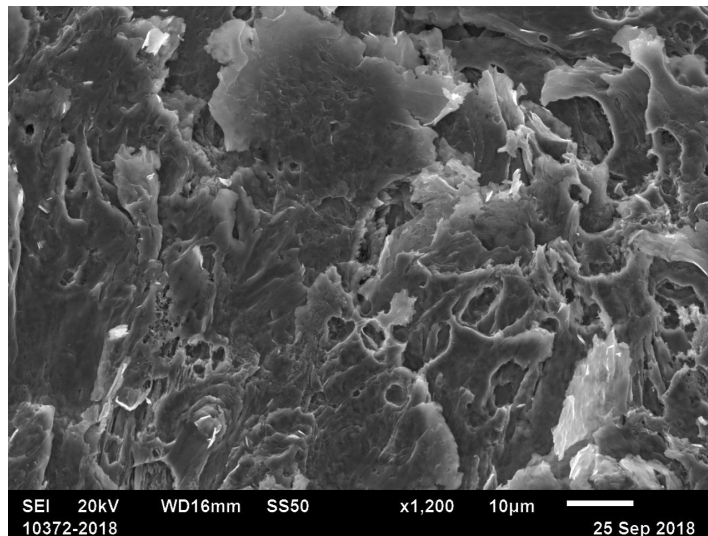



Figura 09: Região 02 - Ampliação: 1200X

| | | | |
|-------------------|------------|-------------------------------------|---|
| Recepção | 20/09/2018 | Analista | Responsável |
| Realização | 25/09/2018 | |  |
| Emissão | 25/09/2018 | Jean Chaves Araújo Laboratorista | Jean Chaves Araújo Laboratorista |

Responsável Técnico LAMAT: João Pousa Alves Filho, CREA-MG 0000168139D

SENAI Itaúna CETEF Marcelino Corradi
Rua Lilia Antunes, 99 - Bairro Nogueira Machado - CEP: 35680-270
Itaúna - MG - Fone: (37) 3249-2400
Página 5 de 6



SENAI FIEMG


Laboratório de Ensaios e Análises em Materiais - LAMAT

Relatório de Microscopia Eletrônica de Varredura

RELATÓRIO DE ANÁLISE Nº: 10372/2018

5 Observações

- O Laboratório de MEV / EDS não emite parecer conclusivo sobre as amostras analisadas;

| | | | |
|-------------------|------------|-------------------------------------|---|
| Recepção | 20/09/2018 | Analista | Responsável |
| Realização | 25/09/2018 | |  |
| Emissão | 25/09/2018 | Jean Chaves Araújo Laboratorista | Jean Chaves Araújo Laboratorista |

Responsável Técnico LAMAT: João Pousa Alves Filho, CREA-MG 0000168139D

SENAI Itaúna CETEF Marcelino Corradi
Rua Lilia Antunes, 99 - Bairro Nogueira Machado - CEP: 35680-270
Itaúna - MG - Fone: (37) 3249-2400
Página 6 de 6

**SENAI FIEMG****Laboratório de Ensaios e Análises em Materiais - LAMAT****Relatório de Análise Metalográfica**
*Report of Metallographic Analysis***Relatório de Ensaio / Test Report Nº:11258/2018**

Solicitante / Client: CARLOS ADEMIR DA SILVA
Endereço / Address: AV. MONSENHOR LUIZ DE GONZAGA 103 - CENTRO - NEPOMUCENO - MG
Material / Material: Amostra para análise
Identificação do Cliente Peça 3
Client Identification:

Microestrutura / Microstructure:

Solda

Macrografia

- Observa-se que a solda apresenta aspecto homogêneo.
- Lado A: Ausência de trincas e porosidades. Nota-se a presença de descontinuidade entre a solda e a chapa.
- Lado B: Ausência de trincas e presença de falta de fusão e porosidade.


Temperatura do Ensaio 24 °C*test temperature:***Observações:**

Este relatório contém resultados que se referem exclusivamente à amostra enviada pelo solicitante e somente deve ser reproduzido por completo, sendo que a reprodução de partes requer aprovação escrita do LAMAT.

This report contain results refered exclusively specimens sent by requester and should only be full reproduced, and the reproductions of parts requires written approval of the LAMAT.

Informações / Informations:

*Ensaio realizado segundo IT LAB 080 e com referência às normas: ASTM E 3:2011; ASTM E 7:2017; ASTM E 407:2007.

Recepção / Reception 11/10/18**Analista**
*Analyst***Responsável**
*Responsible***Realização / Achievement** 22/10/18Dualas Fernando Lopes
Laboratorista
Dualas Fernando Lopes
Laboratorista**Emissão / Emission** 22/10/18**Responsável Técnico LAMAT: João Pousa Alves Filho, CREA-MG 0000168139D***Technical Responsible LAMAT: João Pousa Alves Filho, CREA-MG 0000168139D***SENAI Itaúna CETEF Marcelino Corradi**

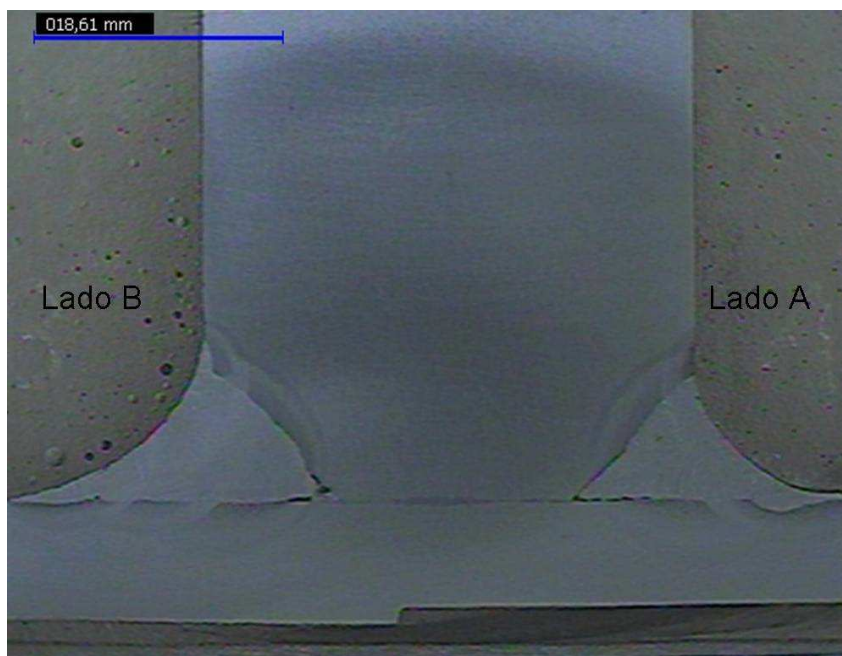
Rua Lilia Antunes, 99 - Bairro: Nogueira Machado - CEP: 35680-270

Itaúna - MG - Fone: (37) 3249-2400

Página 1 de 3

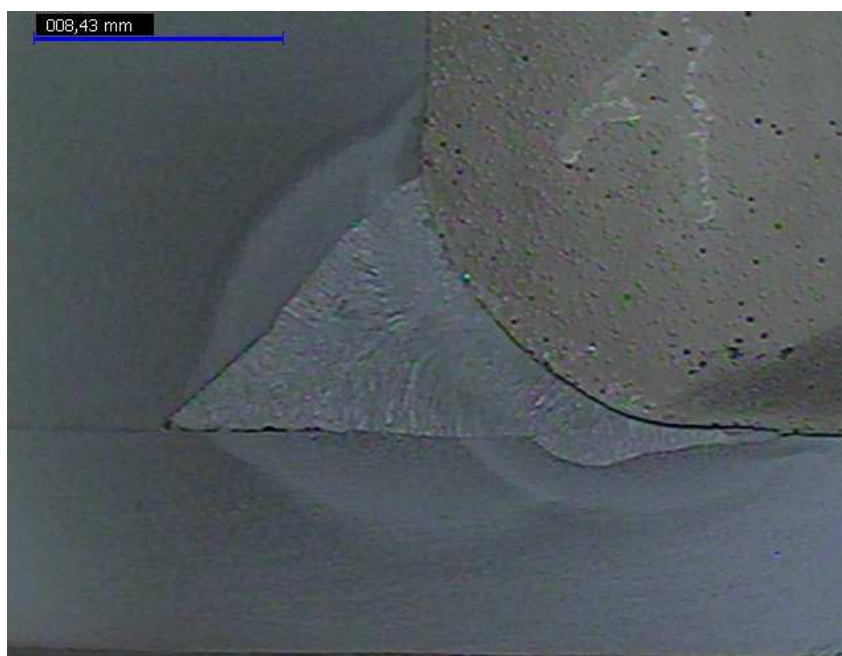


Relatório de Ensaio / Test Report Nº:11258/2018



Solda lado A e lado B.

| | |
|----------------------------|-------------------------------|
| Solda lado A e lado B. | |
| Reativo: Nital 10%. | Ampliação: Aprox. 3,5x |

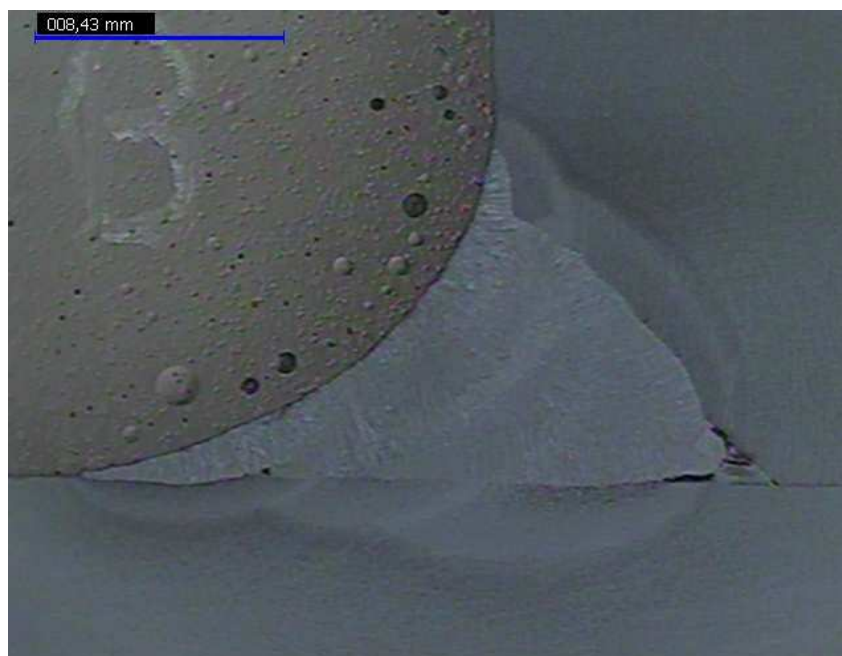


Lado A: Ausência de trincas e porosidades. Nota-se a presença de descontinuidade entre a solda e a chapa.

| | |
|---|-----------------------------|
| Lado A: Ausência de trincas e porosidades. Nota-se a presença de descontinuidade entre a solda e a chapa. | |
| Reativo: Nital 10%. | Ampliação: Aprox. 7x |



Relatório de Ensaio / Test Report Nº:11258/2018



Lado B: Ausência de trincas e presença de falta de fusão e porosidade.

| | |
|--|-----------------------------|
| Lado B: Ausência de trincas e presença de falta de fusão e porosidade. | |
| Reativo: Nital 10%. | Ampliação: Aprox. 7x |

**Relatório de Análise Metalográfica**
*Report of Metallographic Analysis***Relatório de Ensaio / Test Report Nº:11257/2018**

Solicitante / Client: CARLOS ADEMIR DA SILVA
Endereço / Address: AV. MONSENHOR LUIZ DE GONZAGA 103 - CENTRO - NEPOMUCENO - MG
Material / Material: Amostra para análise
Identificação do Cliente Peça 2
Client Identification:

Microestrutura / Microstructure:

Solda

Macrografia

- Observa-se que a solda apresenta aspecto homogêneo.
- Lado A: Ausência de trincas e porosidades. Nota-se a presença de falta de fusão.
- Lado B: Presença de trincas, porosidade e falta de fusão.


Temperatura do Ensaio 24 °C*test temperature:***Observações:**

Este relatório contém resultados que se referem exclusivamente à amostra enviada pelo solicitante e somente deve ser reproduzido por completo, sendo que a reprodução de partes requer aprovação escrita do LAMAT.

This report contain results refered exclusively specimens sent by requester and should only be full reproduced, and the reproductions of parts requires written approval of the LAMAT.

Informações / Informations:

*Ensaio realizado segundo IT LAB 080 e com referência às normas: ASTM E 3:2011; ASTM E 7:2017; ASTM E 407:2007.

Recepção / Reception 11/10/18**Analista**
*Analyst***Responsável**
*Responsible***Realização / Achievement** 22/10/18Dualas Fernando Lopes
Laboratorista
Dualas Fernando Lopes
Laboratorista**Emissão / Emission** 22/10/18**Responsável Técnico LAMAT: João Pousa Alves Filho, CREA-MG 0000168139D***Technical Responsible LAMAT: João Pousa Alves Filho, CREA-MG 0000168139D*

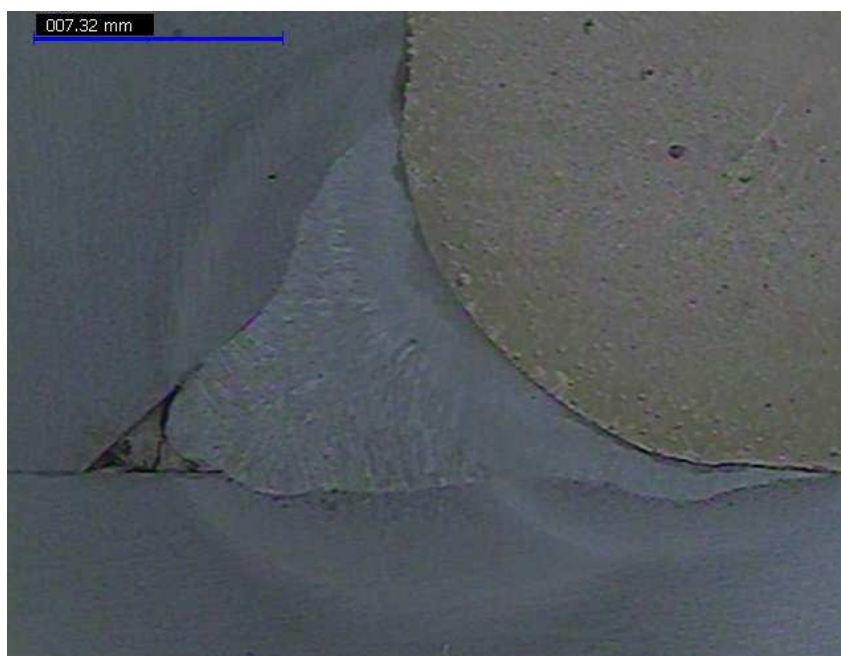


Relatório de Ensaio / Test Report Nº:11257/2018



Solda lado A e lado B.

| | |
|----------------------------|-------------------------------|
| Solda lado A e lado B. | |
| Reativo: Nital 10%. | Ampliação: Aprox. 3,5x |



Lado A: Ausência de trincas e porosidades . Presença de falta de fusão.

| | |
|---|-----------------------------|
| Lado A: Ausência de trincas e porosidades . Presença de falta de fusão. | |
| Reativo: Nital 10%. | Ampliação: Aprox. 7x |



Relatório de Ensaio / Test Report Nº:11257/2018



Labo B: Presença de trincas, porosidade e falta de fusão.

| | |
|---|-----------------------------|
| Labo B: Presença de trincas, porosidade e falta de fusão. | |
| Reativo: Nital 10%. | Ampliação: Aprox. 7x |

**Relatório de Análise Metalográfica**
*Report of Metallographic Analysis***Relatório de Ensaio / Test Report Nº:11256/2018**

Solicitante / Client: CARLOS ADEMIR DA SILVA
Endereço / Address: AV. MONSENHOR LUIZ DE GONZAGA 103 - CENTRO - NEPOMUCENO - MG
Material / Material: Amostra para análise
Identificação do Cliente Peça 1
Client Identification:

Microestrutura / Microstructure:

Solda

Macrografia

- Observa-se que a solda apresenta aspecto homogêneo.
- Lado A: Ausência de trincas e porosidades. Nota-se a presença de falta de fusão.
- Lado B: Ausência de trincas e porosidades. Nota-se a presença de falta de fusão.


Temperatura do Ensaio 24 °C*test temperature:***Observações:**

Este relatório contém resultados que se referem exclusivamente à amostra enviada pelo solicitante e somente deve ser reproduzido por completo, sendo que a reprodução de partes requer aprovação escrita do LAMAT.

This report contain results refered exclusively specimens sent by requester and should only be full reproduced, and the reproductions of parts requires written approval of the LAMAT.

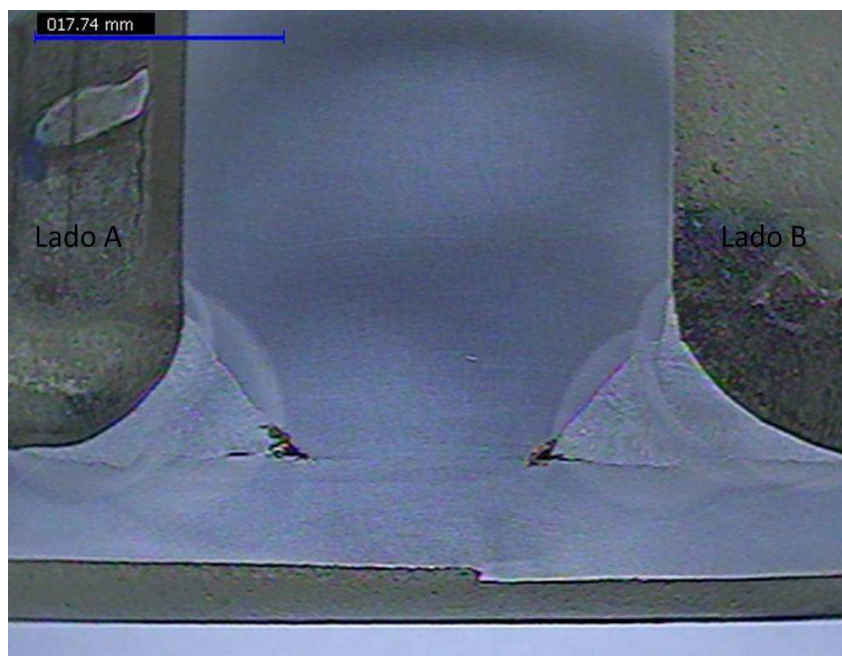
Informações / Informations:

*Ensaio realizado segundo IT LAB 080 e com referência às normas: ASTM E 3:2011; ASTM E 7:2017; ASTM E 407:2007.

Recepção / Reception 11/10/18**Analista**
*Analyst***Responsável**
*Responsible***Realização / Achievement** 22/10/18Dualas Fernando Lopes
Laboratorista
Dualas Fernando Lopes
Laboratorista**Emissão / Emission** 22/10/18**Responsável Técnico LAMAT: João Pousa Alves Filho, CREA-MG 0000168139D***Technical Responsible LAMAT: João Pousa Alves Filho, CREA-MG 0000168139D*



Relatório de Ensaio / Test Report Nº:11256/2018



Solda lado A e lado B.

| | |
|----------------------------|-------------------------------|
| Solda lado A e lado B. | |
| Reativo: Nital 10%. | Ampliação: Aprox. 3,5x |



Lado A: Ausência de trincas e porosidades . Presença de falta de fusão.

| | |
|---|-------------------------------|
| Lado A: Ausência de trincas e porosidades . Presença de falta de fusão. | |
| Reativo: Nital 10%. | Ampliação: Aprox. 7,5x |



Relatório de Ensaio / Test Report Nº:11256/2018



Lado B: Ausência de trincas e porosidades . Presença de falta de fusão.

| | |
|---|-------------------------------|
| Lado B: Ausência de trincas e porosidades . Presença de falta de fusão. | |
| Reativo: Nital 10%. | Ampliação: Aprox. 7,5x |

**SENAI FIEMG****Laboratório de Ensaios e Análises em Materiais - LAMAT****Relatório de Análise Metalográfica**
*Report of Metallographic Analysis***Relatório de Ensaio / Test Report Nº:11255/2018**

Solicitante / Client: CARLOS ADEMIR DA SILVA
Endereço / Address: AV. MONSENHOR LUIZ DE GONZAGA 103 - CENTRO - NEPOMUCENO - MG
Material / Material: Amostra para análise
Identificação do Cliente Peça 3
Client Identification:

Microestrutura / Microstructure:

Solda

Estrutura típica de:

- Metal depositado lado A e B: - Ferrita alotriomórfica, acicular e de segunda fase.
- ZTA lado A e B: - Ferrita alotriomórfica, acicular e perlita.
- Metal base: - Ferrita equiaxial e perlita.

Temperatura do Ensaio 24 °C*test temperature:***Observações:**

Este relatório contém resultados que se referem exclusivamente à amostra enviada pelo solicitante e somente deve ser reproduzido por completo, sendo que a reprodução de partes requer aprovação escrita do LAMAT.

This report contain results refered exclusively specimens sent by requester and should only be full reproduced, and the reproductions of parts requires written approval of the LAMAT.

Informações / Informations:

*Ensaio realizado segundo IT LAB 082 e com referência às normas: ASTM E 3:2011; ASTM E 7:2017; ASTM E 407:2007.

Recepção / Reception 11/10/18**Analista**
*Analyst***Responsável**
*Responsible***Realização / Achievement** 22/10/18Dualas Fernando Lopes
Laboratorista
Dualas Fernando Lopes
Laboratorista**Emissão / Emission** 22/10/18**Responsável Técnico LAMAT: João Pousa Alves Filho, CREA-MG 0000168139D***Technical Responsible LAMAT: João Pousa Alves Filho, CREA-MG 0000168139D***SENAI Itaúna CETEF Marcelino Corradi**

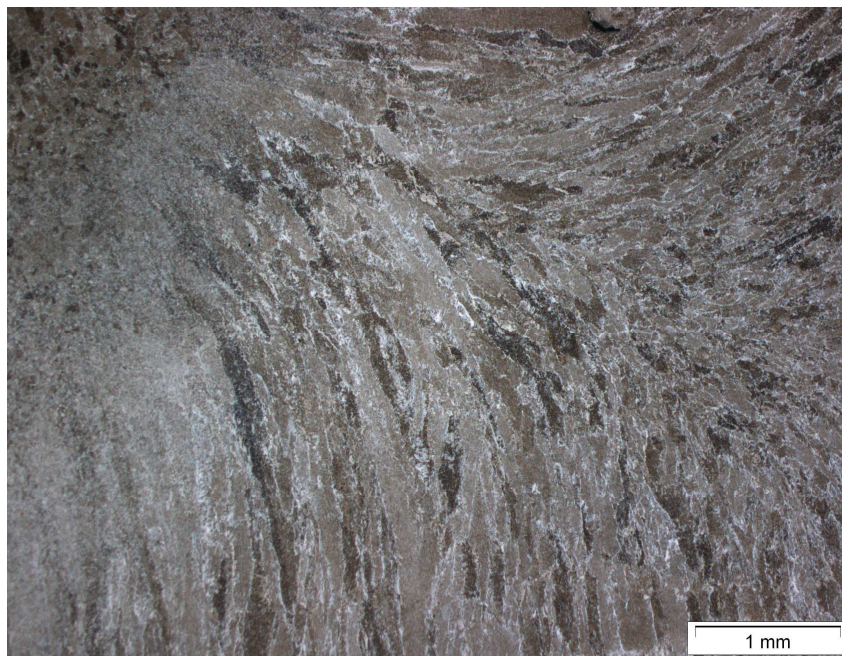
Rua Lilia Antunes, 99 - Bairro: Nogueira Machado - CEP: 35680-270

Itaúna - MG - Fone: (37) 3249-2400

Página 1 de 4



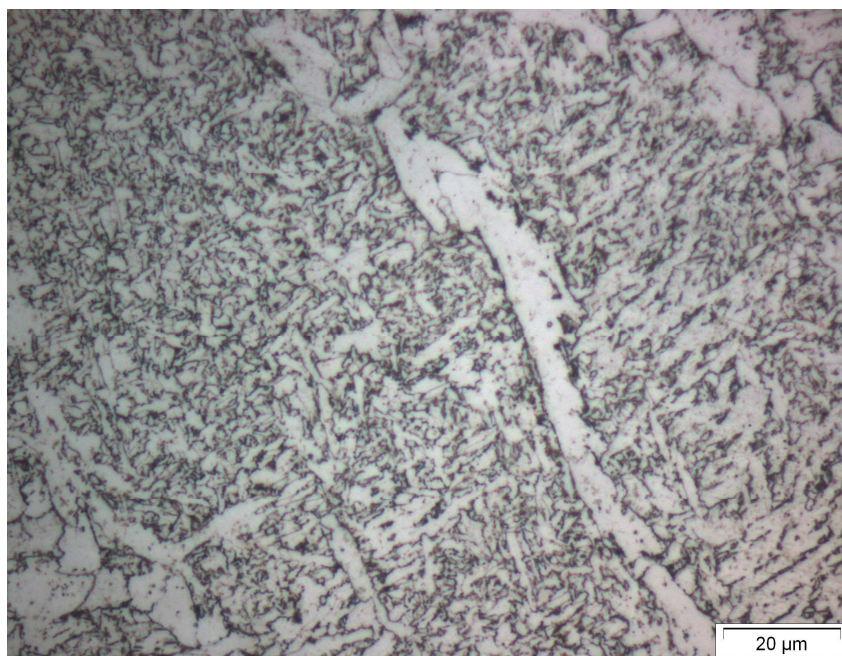
Relatório de Ensaio / Test Report Nº:11255/2018



Metal depositado.

Reativo: Nital 2%.

Ampliação: 25x



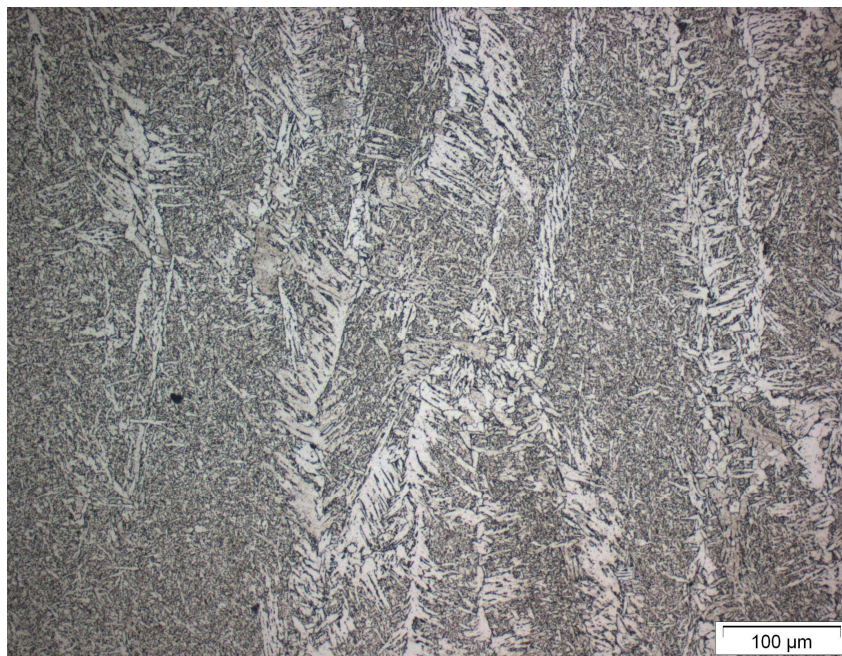
Metal depositado: Ferrita alotriomórfica e de segunda fase.

Reativo: Nital 2%.

Ampliação: 1000x



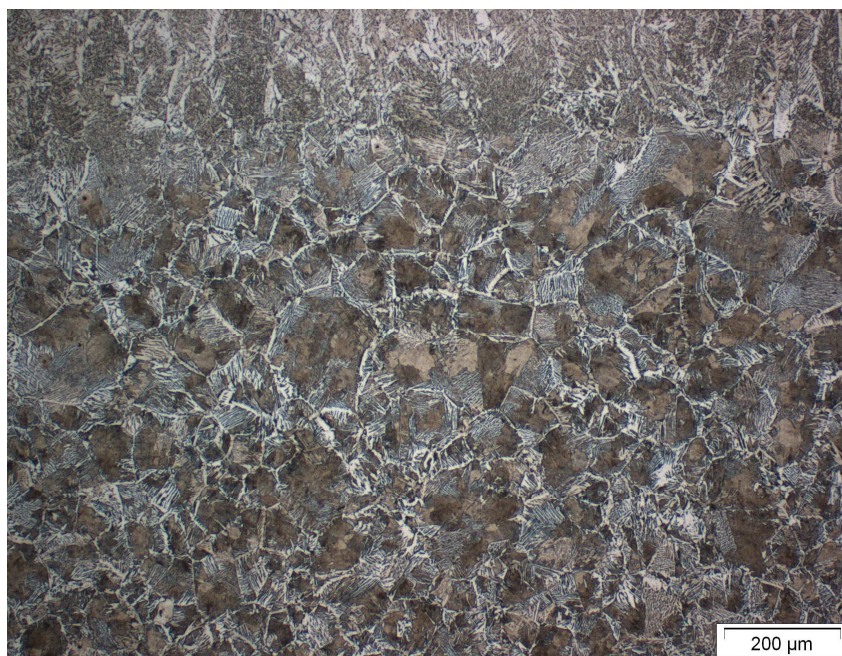
Relatório de Ensaio / Test Report Nº:11255/2018



Metal depositado: Ferrita acicular.

Reativo: Nital 2%.

Ampliação: 200x



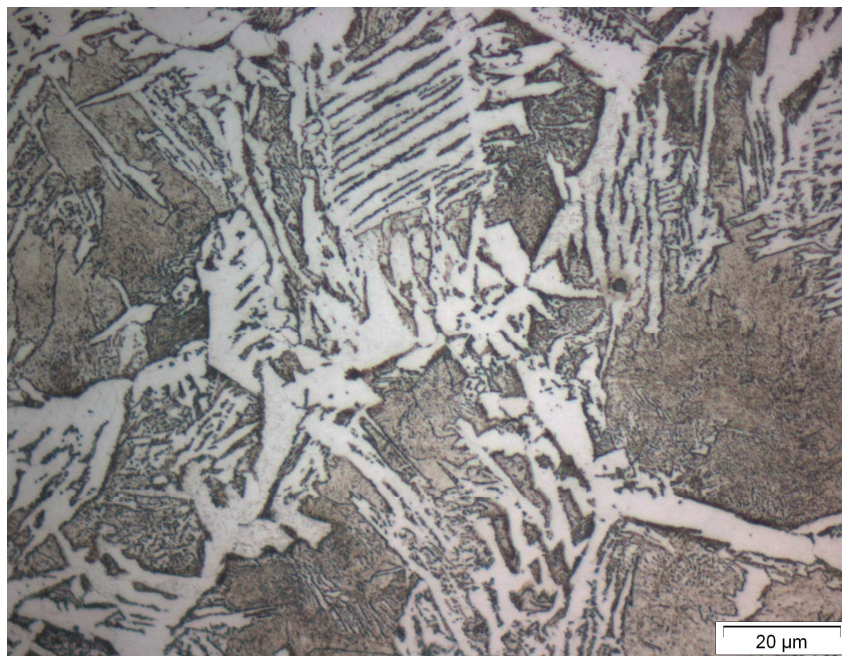
ZTA

Reativo: Nital 2%.

Ampliação: 100x

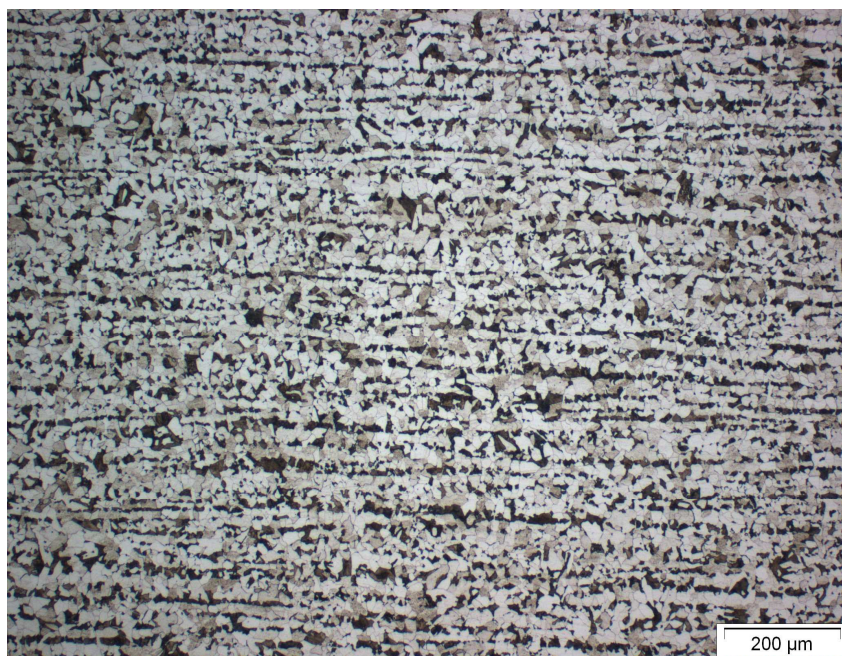


Relatório de Ensaio / Test Report Nº:11255/2018



ZTA: Ferrita alotriomórfica, acicular e perlita.

| | |
|--|-------------------------|
| ZTA: Ferrita alotriomórfica, acicular e perlita. | |
| Reativo: Nital 2%. | Ampliação: 1000x |



Metal de base: Ferrita equiaxial e perlita.

| | |
|---|------------------------|
| Metal de base: Ferrita equiaxial e perlita. | |
| Reativo: Nital 2%. | Ampliação: 100x |

**Relatório de Análise Metalográfica**
*Report of Metallographic Analysis***Relatório de Ensaio / Test Report Nº:11254/2018**

Solicitante / Client: CARLOS ADEMIR DA SILVA
Endereço / Address: AV. MONSENHOR LUIZ DE GONZAGA 103 - CENTRO - NEPOMUCENO - MG
Material / Material: Amostra para análise
Identificação do Cliente Peça 2
Client Identification:

Microestrutura / Microstructure:

Solda

Estrutura típica de:

- Metal depositado Lado A e B : Ferrita alotriomórfica, acicular e de segunda fase.
- ZTA Lado A e B: Ferrita alotriomórfica, acicular e perlita.
- Metal base: Ferrita equiaxial e perlita.

Temperatura do Ensaio 25 °C*test temperature:***Observações:**

Este relatório contém resultados que se referem exclusivamente à amostra enviada pelo solicitante e somente deve ser reproduzido por completo, sendo que a reprodução de partes requer aprovação escrita do LAMAT.

This report contain results refered exclusively specimens sent by requester and should only be full reproduced, and the reproductions of parts requires written approval of the LAMAT.

Informações / Informations:

*Ensaio realizado segundo IT LAB 082 e com referência às normas: ASTM E 3:2011; ASTM E 7:2017; ASTM E 407:2007.

Recepção / Reception 11/10/18**Analista**
*Analyst***Responsável**
*Responsible***Realização / Achievement** 19/10/18Dualas Fernando Lopes
Laboratorista
Dualas Fernando Lopes
Laboratorista**Emissão / Emission** 19/10/18**Responsável Técnico LAMAT: João Pousa Alves Filho, CREA-MG 0000168139D***Technical Responsible LAMAT: João Pousa Alves Filho, CREA-MG 0000168139D***SENAI Itaúna CETEF Marcelino Corradi**

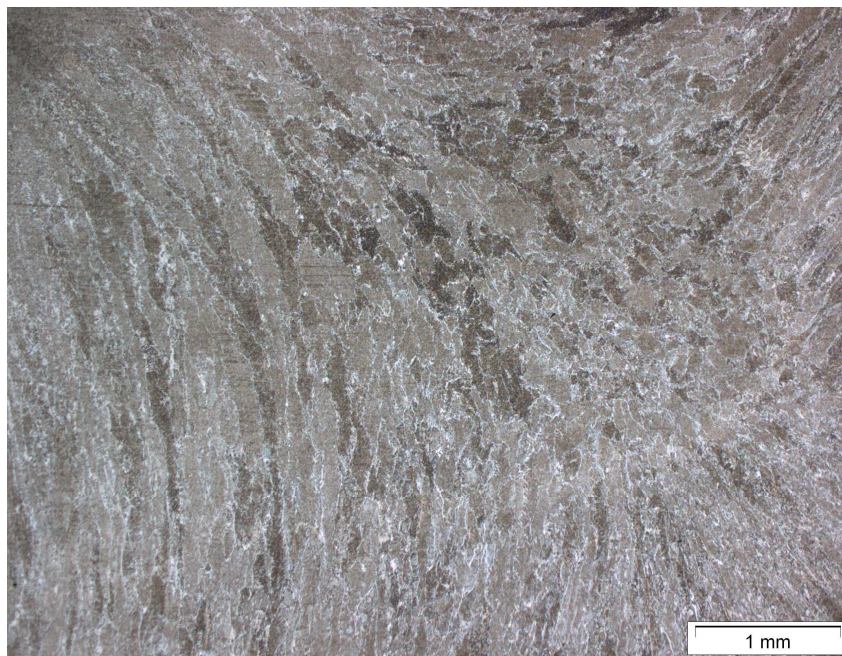
Rua Lilia Antunes, 99 - Bairro: Nogueira Machado - CEP: 35680-270

Itaúna - MG - Fone: (37) 3249-2400

Página 1 de 4



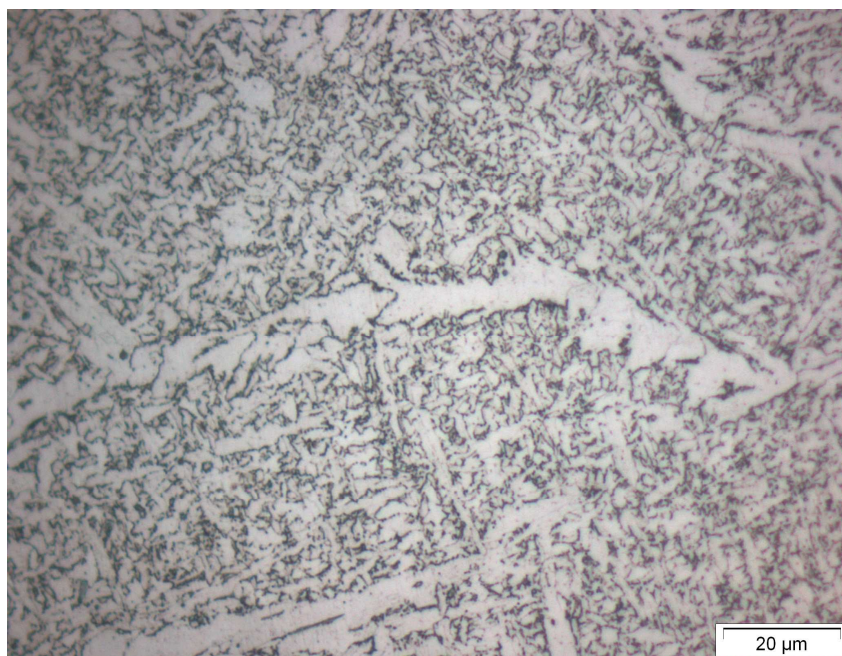
Relatório de Ensaio / Test Report Nº:11254/2018



Metal depositado.

Reativo: Nital 2%.

Ampliação: 25x



Metal depositado: Ferrita alotriomórfica e de segunda fase.

Reativo: Nital 2%.

Ampliação: 1000x

SENAI Itaúna CETEF Marcelino Corradi

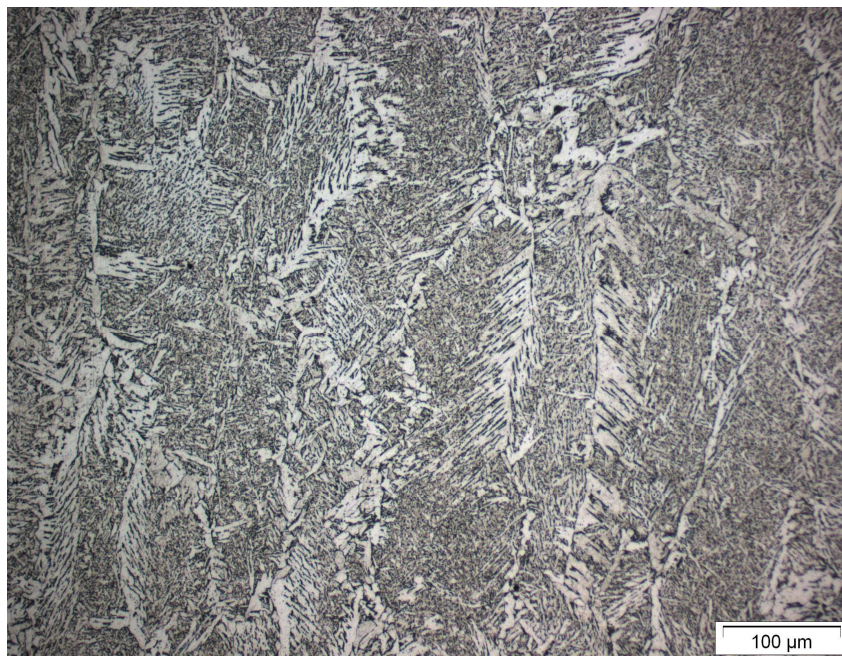
Rua Lilia Antunes, 99 - Bairro: Nogueira Machado - CEP: 35680-270

Itaúna - MG - Fone: (37) 3249-2400

Página 2 de 4



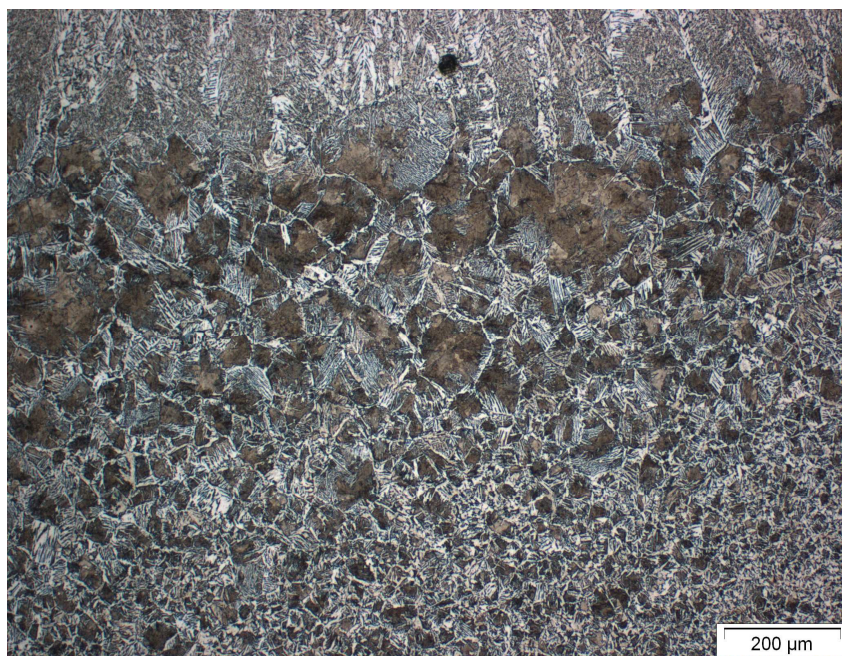
Relatório de Ensaio / Test Report Nº:11254/2018



Metal depositado: Ferrita acicular.

Reativo: Nital 2%.

Ampliação: 200x



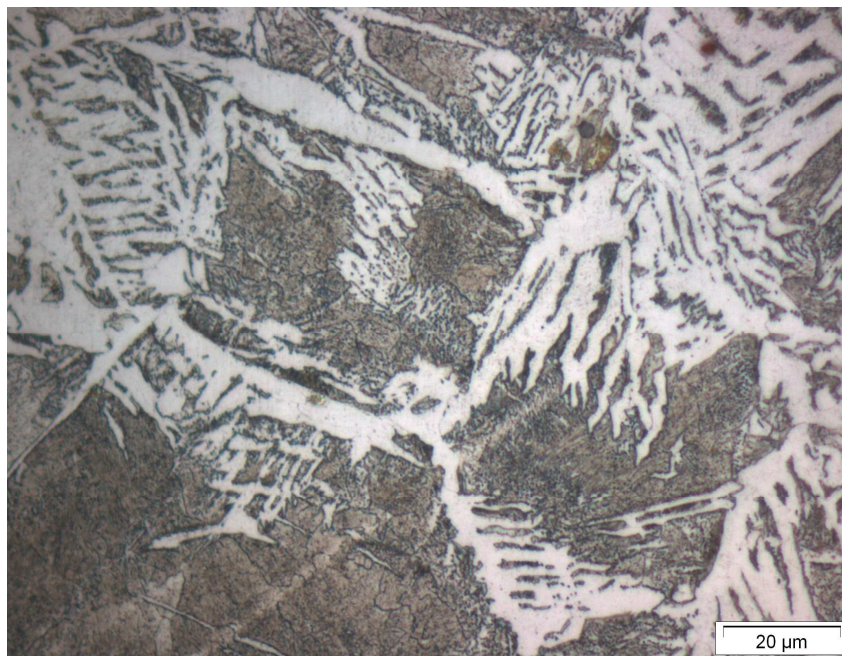
ZTA.

Reativo: Nital 2%.

Ampliação: 100x

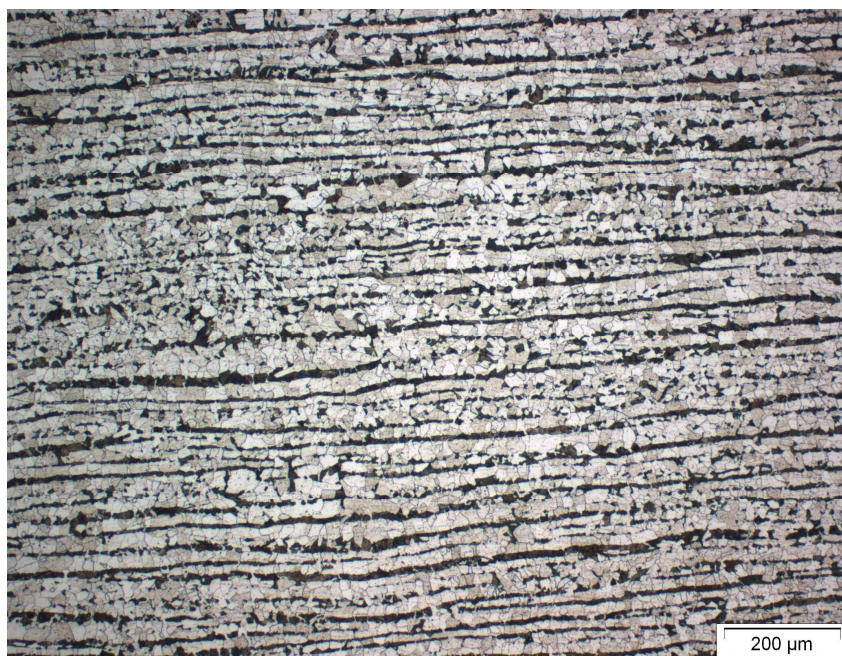


Relatório de Ensaio / Test Report Nº:11254/2018



ZTA - Ferrita alotriomórfica, acicular e perlita.

| | |
|---|-------------------------|
| ZTA - Ferrita alotriomórfica, acicular e perlita. | |
| Reativo: Nital 2%. | Ampliação: 1000x |



Metal base: Ferrita equiaxial e perlita.

| | |
|--|------------------------|
| Metal base: Ferrita equiaxial e perlita. | |
| Reativo: Nital 2%. | Ampliação: 100x |

**SENAI FIEMG****Laboratório de Ensaios e Análises em Materiais - LAMAT****Relatório de Análise Metalográfica**
*Report of Metallographic Analysis***Relatório de Ensaio / Test Report Nº:11253/2018**

Solicitante / Client: CARLOS ADEMIR DA SILVA
Endereço / Address: AV. MONSENHOR LUIZ DE GONZAGA 103 - CENTRO - NEPOMUCENO - MG
Material / Material: Amostra para análise
Identificação do Cliente Peça 1
Client Identification:

Microestrutura / Microstructure:

Solda

Estrutura constituída de:

- Metal depositado lado A e B: Ferrita alotriomórfica, acicular e de segunda fase.
- ZTA Lado A e B: Ferrita alotriomórfica, acicular e perlita.
- Metal base: Ferrita equiaxial e perlita.

Temperatura do Ensaio 24 °C*test temperature:***Observações:**

Este relatório contém resultados que se referem exclusivamente à amostra enviada pelo solicitante e somente deve ser reproduzido por completo, sendo que a reprodução de partes requer aprovação escrita do LAMAT.

This report contain results refered exclusively specimens sent by requester and should only be full reproduced, and the reproductions of parts requires written approval of the LAMAT.

Informações / Informations:

*Ensaio realizado segundo IT LAB 082 e com referência às normas: ASTM E 3:2011; ASTM E 7:2017; ASTM E 407:2007.

Recepção / Reception 11/10/18**Analista**
*Analyst***Responsável**
*Responsible***Realização / Achievement** 22/10/18Dualas Fernando Lopes
Laboratorista
Dualas Fernando Lopes
Laboratorista**Emissão / Emission** 22/10/18**Responsável Técnico LAMAT: João Pousa Alves Filho, CREA-MG 0000168139D***Technical Responsible LAMAT: João Pousa Alves Filho, CREA-MG 0000168139D***SENAI Itaúna CETEF Marcelino Corradi**

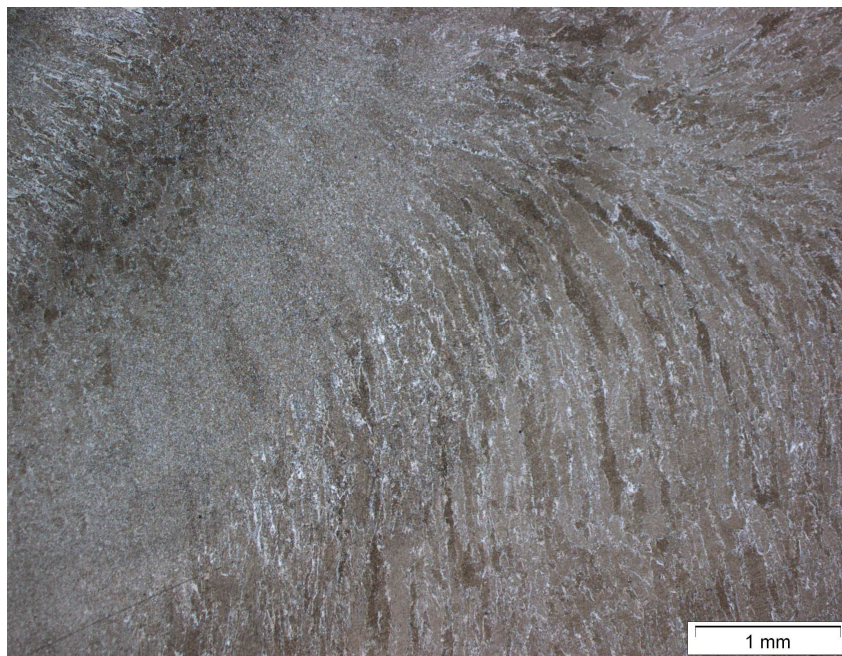
Rua Lilia Antunes, 99 - Bairro: Nogueira Machado - CEP: 35680-270

Itaúna - MG - Fone: (37) 3249-2400

Página 1 de 4



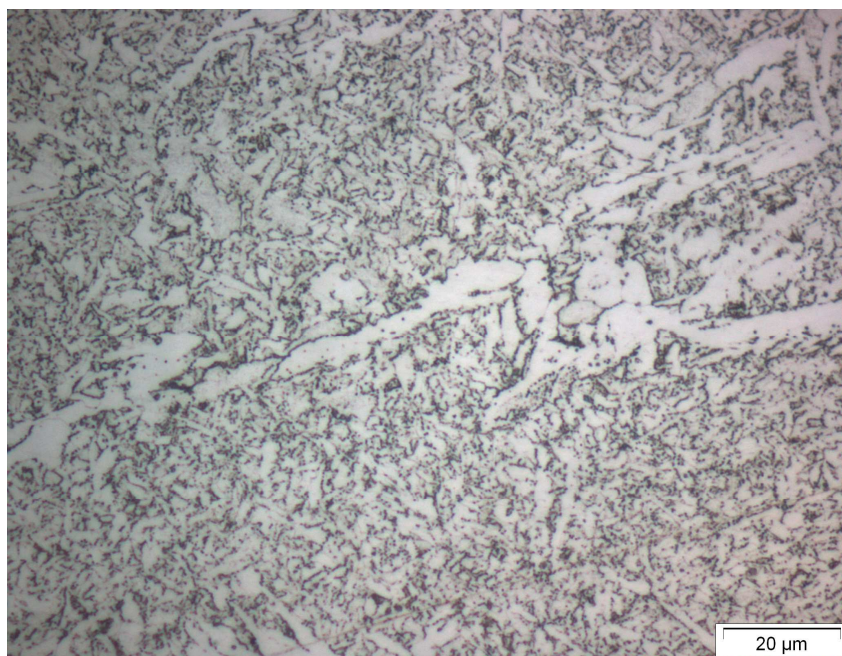
Relatório de Ensaio / Test Report Nº:11253/2018



Metal depositado.

Reativo: Nital 2%.

Ampliação: 25x.



Metal depositado: Ferrita alotriomórfica e de segunda fase.

Reativo: Nital 2%.

Ampliação: 1000x.

SENAI Itaúna CETEF Marcelino Corradi

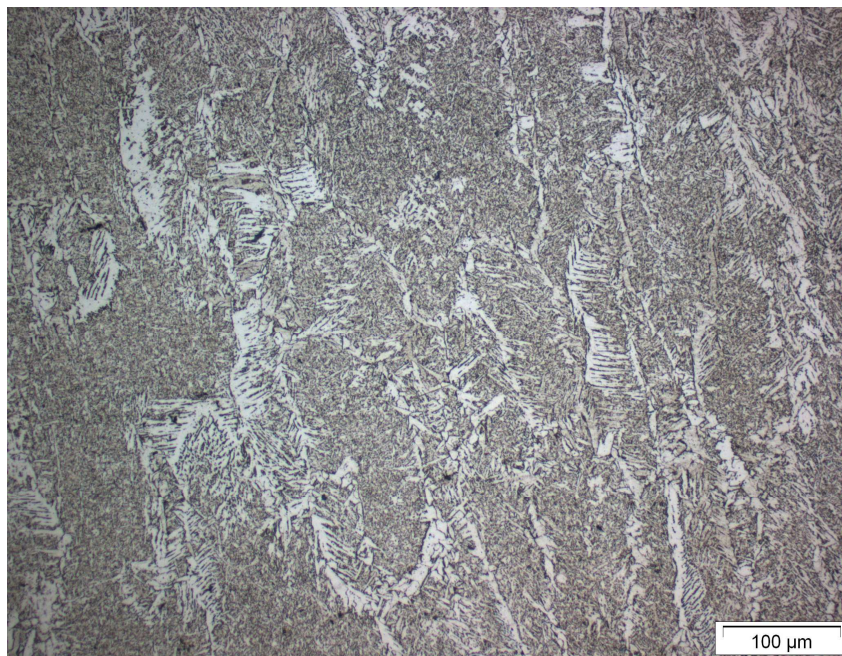
Rua Lilia Antunes, 99 - Bairro: Nogueira Machado - CEP: 35680-270

Itaúna - MG - Fone: (37) 3249-2400

Página 2 de 4



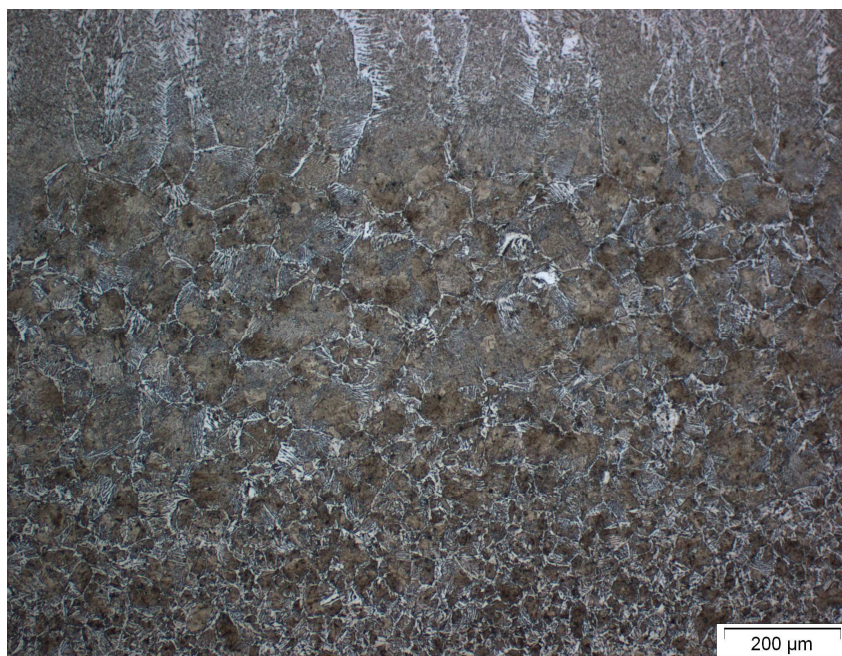
Relatório de Ensaio / Test Report Nº:11253/2018



Metal depositado: Ferrita acicular.

Reativo: Nital 2%.

Ampliação: 200x.



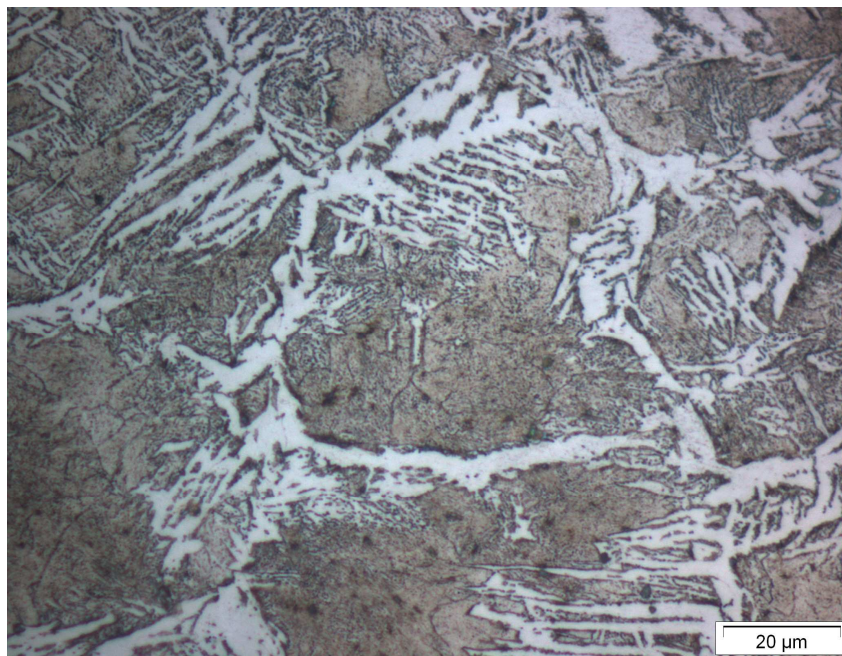
ZTA.

Reativo: Nital 2%.

Ampliação: 100x.



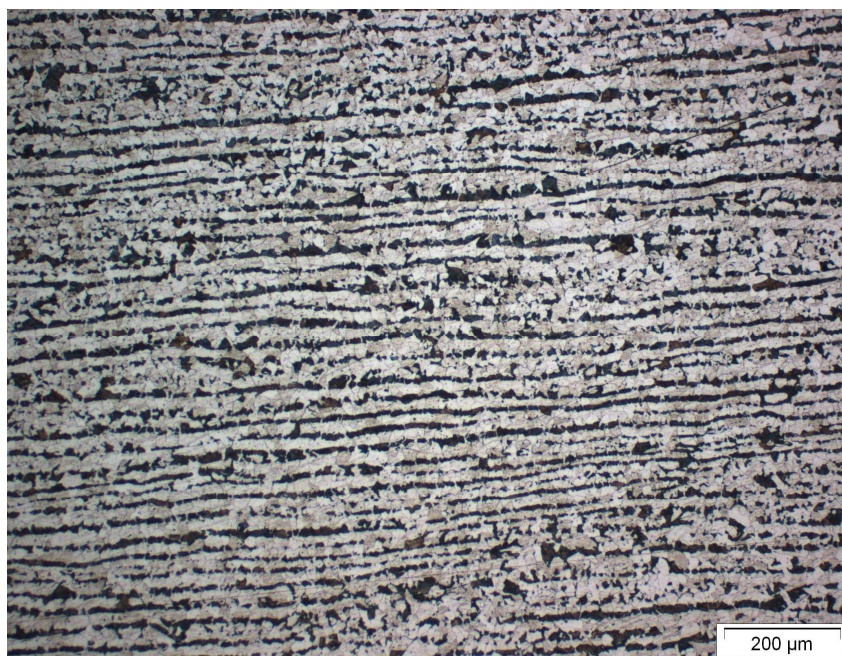
Relatório de Ensaio / Test Report Nº:11253/2018



ZTA - Ferrita alotriomórfica, acicular e perlita.

Reativo: Nital 2%.

Ampliação: 1000x.



Metal base: Ferrita equiaxial e perlita.

Reativo: Nital 2%.

Ampliação: 100x.

**Relatório de Análises Metalográficas***Relatório of Metallographic Analysis***Relatório de Ensaio / Test Report Nº: 11264/2018**

Solicitante / Client: CARLOS ADEMIR DA SILVA
Endereço / Address: AV. MONSENHOR LUIZ DE GONZAGA 103 - CENTRO - NEPOMUCENO - MG
Material / Material: Amostra para análise
Identificação do Cliente Peça 3 - B
Client Identification:

Dureza Vickers HV 10/20**Valores Encontrados / Found Values**

| Pontos Valores | Points Values |
|------------------|-----------------|
| 1 | 170,15 |
| 2 | 220,33 |
| 3 | 212,56 |
| 4 | 206,92 |
| 5 | 197,24 |

| Pontos Valores | Points Values |
|------------------|-----------------|
| 6 | 193,13 |
| 7 | 242,37 |
| 8 | --- |
| 9 | --- |
| 10 | --- |

| Pontos Valores | Points Values |
|------------------|-----------------|
| 11 | --- |
| 12 | --- |
| 13 | --- |
| 14 | --- |
| 15 | --- |

| Pontos Valores | Points Values |
|------------------|-----------------|
| 16 | --- |
| 17 | --- |
| 18 | --- |
| 19 | --- |
| 20 | --- |

| Valor Mínimo | Minimum Value |
|--------------|---------------|
| 170,15 | |

| Valor Médio | Average Value |
|-------------|---------------|
| 206,10 | |

| Valor Máximo | Maximum Value |
|--------------|---------------|
| 242,37 | |

Este relatório contém resultados que se referem exclusivamente à amostra enviada pelo solicitante e somente deve ser reproduzido por completo, sendo que a reprodução de partes requer aprovação escrita do LAMAT.

This report contain results refered exclusively specimens sent by requester and should only be full reproduced, and the reproductions of parts requires written approval of the LAMAT.

Observações / Observations:

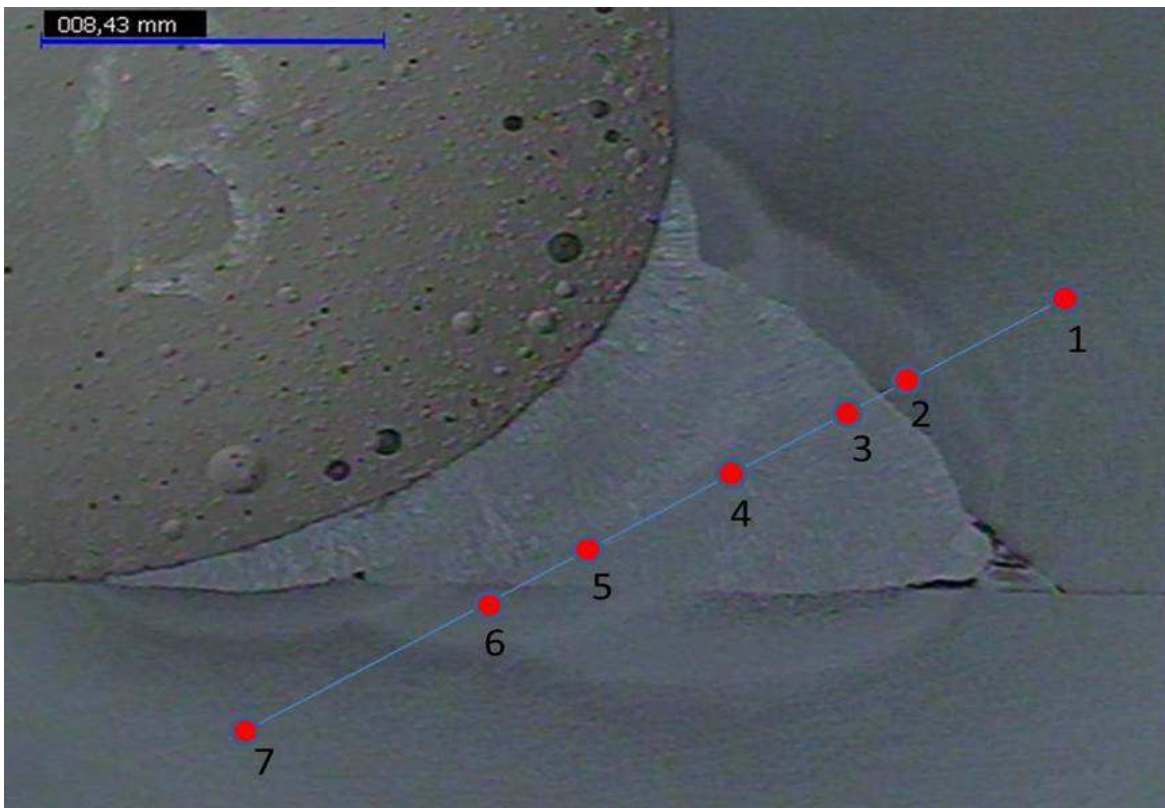
O valor médio corresponde as 7 impressões.
Penetrador : Pirâmide de diamante de base quadrada.
Força (N) : 98,040
Reativo: Nital 10%.
Aumento: 400x.
Temperatura: 21,9°C.
Carga: 10000 g
Norma de referência : ABNT NBR NM ISO 6507-1:2008.
Local de ensaio: Conforme orientação do cliente.

Equipamento utilizado: Microdurômetro Ótico Wolpert nº 62279 e Shimadzu nº 122514.



Relatório de Ensaio / Test Report Nº: 11264/2018

CROQUI / SKETCH



Recepção / Reception 11/10/18

Analista
Analyst

Responsável
Responsible

Realização / Achievement 23/10/18

Dualas Fernando Lopes
Laboratorista

Dualas Lopes

Emissão / Emission 23/10/18

Dualas Fernando Lopes
Laboratorista

Responsável Técnico LAMAT: João Pousa Alves Filho, CREA-MG 0000168139D

Technical Responsible LAMAT: João Pousa Alves Filho, CREA-MG 0000168139D

SENAI Itaúna CETEF Marcelino Corradi

Rua Lilia Antunes, 99 - Bairro: Nogueira Machado - CEP: 35680-270

Itaúna - MG - Fone: (37) 3249-2400

**Relatório de Análises Metalográficas***Relatório of Metallographic Analysis***Relatório de Ensaio / Test Report Nº: 11262/2018**

Solicitante / Client: CARLOS ADEMIR DA SILVA
Endereço / Address: AV. MONSENHOR LUIZ DE GONZAGA 103 - CENTRO - NEPOMUCENO - MG
Material / Material: Amostra para análise
Identificação do Cliente Peça 2 - B
Client Identification:

Dureza Vickers HV 10/20**Valores Encontrados / Found Values**

| Pontos Valores | |
|------------------|--------|
| Points Values | |
| 1 | 155,00 |
| 2 | 200,17 |
| 3 | 209,36 |
| 4 | 192,51 |
| 5 | 178,71 |

| Pontos Valores | |
|------------------|--------|
| Points Values | |
| 6 | 187,04 |
| 7 | 148,28 |
| 8 | --- |
| 9 | --- |
| 10 | --- |

| Pontos Valores | |
|------------------|-----|
| Points Values | |
| 11 | --- |
| 12 | --- |
| 13 | --- |
| 14 | --- |
| 15 | --- |

| Pontos Valores | |
|------------------|-----|
| Points Values | |
| 16 | --- |
| 17 | --- |
| 18 | --- |
| 19 | --- |
| 20 | --- |

| Valor Mínimo |
|---------------|
| Minimum Value |
| 148,28 |

| Valor Médio |
|---------------|
| Average Value |
| 181,58 |

| Valor Máximo |
|---------------|
| Maximum Value |
| 209,36 |

Este relatório contém resultados que se referem exclusivamente à amostra enviada pelo solicitante e somente deve ser reproduzido por completo, sendo que a reprodução de partes requer aprovação escrita do LAMAT.

This report contain results refered exclusively specimens sent by requester and should only be full reproduced, and the reproductions of parts requires written approval of the LAMAT.

Observações / Observations:

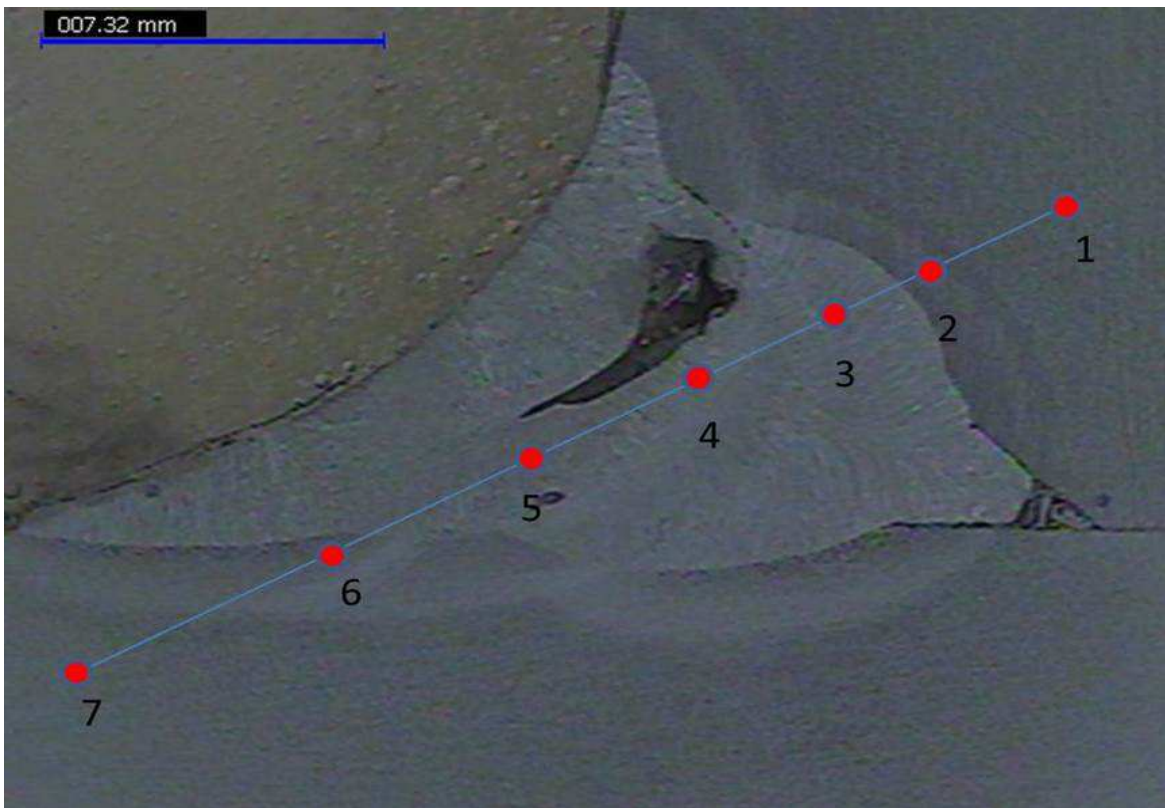
O valor médio corresponde as 7 impressões.
Penetrador : Pirâmide de diamante de base quadrada.
Força (N) : 98,040
Reativo: Nital 10%.
Aumento: 400x.
Temperatura: 21,9°C.
Carga: 10000 g
Norma de referência : ABNT NBR NM ISO 6507-1:2008.
Local de ensaio: Conforme orientação do cliente.

Equipamento utilizado: Microdurômetro Ótico Wolpert nº 62279 e Shimadzu nº 122514.



Relatório de Ensaio / Test Report Nº: 11262/2018

CROQUI / SKETCH



Recepção / Reception 11/10/18

Realização / Achievement 22/10/18

Emissão / Emission 22/10/18

Analista
Analyst

Dualas Fernando Lopes
Laboratorista

Responsável
Responsible

Dualas Lopes
Dualas Fernando Lopes
Laboratorista

Responsável Técnico LAMAT: João Pousa Alves Filho, CREA-MG 0000168139D

Technical Responsible LAMAT: João Pousa Alves Filho, CREA-MG 0000168139D

SENAI Itaúna CETEF Marcelino Corradi

Rua Lilia Antunes, 99 - Bairro: Nogueira Machado - CEP: 35680-270

Itaúna - MG - Fone: (37) 3249-2400

**Relatório de Análises Metalográficas***Relatório of Metallographic Analysis***Relatório de Ensaio / Test Report Nº: 11263/2018**

Solicitante / Client: CARLOS ADEMIR DA SILVA
Endereço / Address: AV. MONSENHOR LUIZ DE GONZAGA 103 - CENTRO - NEPOMUCENO - MG
Material / Material: Amostra para análise
Identificação do Cliente Peça 3 - A
Client Identification:

Dureza Vickers HV 10/20**Valores Encontrados / Found Values**

| Pontos Valores | |
|------------------|--------|
| Points Values | |
| 1 | 159,12 |
| 2 | 215,47 |
| 3 | 211,84 |
| 4 | 204,18 |
| 5 | 197,24 |

| Pontos Valores | |
|------------------|--------|
| Points Values | |
| 6 | 190,66 |
| 7 | 166,85 |
| 8 | --- |
| 9 | --- |
| 10 | --- |

| Pontos Valores | |
|------------------|-----|
| Points Values | |
| 11 | --- |
| 12 | --- |
| 13 | --- |
| 14 | --- |
| 15 | --- |

| Pontos Valores | |
|------------------|-----|
| Points Values | |
| 16 | --- |
| 17 | --- |
| 18 | --- |
| 19 | --- |
| 20 | --- |

| Valor Mínimo |
|---------------|
| Minimum Value |
| 159,12 |

| Valor Médio |
|---------------|
| Average Value |
| 192,20 |

| Valor Máximo |
|---------------|
| Maximum Value |
| 215,47 |

Este relatório contém resultados que se referem exclusivamente à amostra enviada pelo solicitante e somente deve ser reproduzido por completo, sendo que a reprodução de partes requer aprovação escrita do LAMAT.

This report contain results refered exclusively specimens sent by requester and should only be full reproduced, and the reproductions of parts requires written approval of the LAMAT.

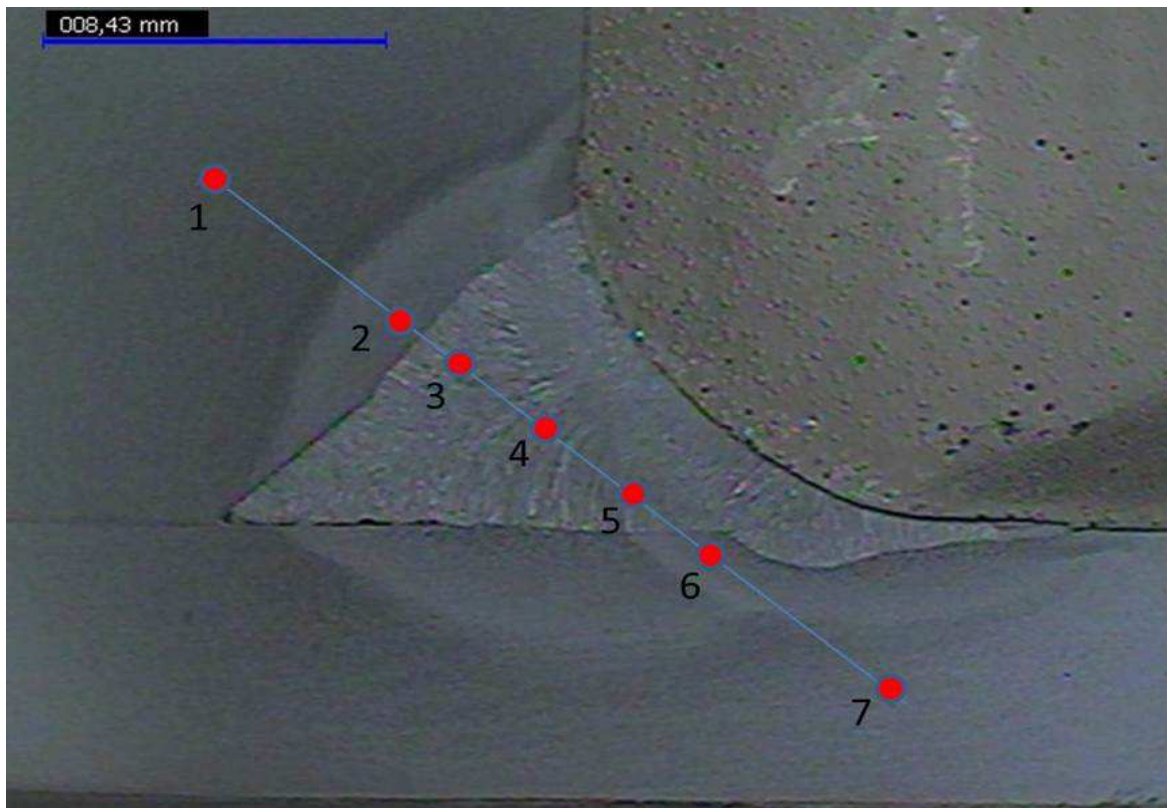
Observações / Observations:

O valor médio corresponde as 7 impressões.
Penetrador : Pirâmide de diamante de base quadrada.
Força (N) : 98,040
Reativo: Nital 10%.
Aumento: 400x.
Temperatura: 21,5°C.
Carga: 10000 g
Norma de referência : ABNT NBR NM ISO 6507-1:2008.
Local de ensaio: Conforme orientação do cliente.

Equipamento utilizado: Microdurômetro Ótico Wolpert nº 62279 e Shimadzu nº 122514.

Relatório de Ensaio / Test Report Nº: 11263/2018

CROQUI / SKETCH



Recepção / Reception 11/10/18

Analista
Analyst

Responsável
Responsible

Realização / Achievement 23/10/18

Dualas Fernando Lopes
Laboratorista

Dualas Lopes

Emissão / Emission 23/10/18

Dualas Fernando Lopes
Laboratorista

Responsável Técnico LAMAT: João Pousa Alves Filho, CREA-MG 0000168139D

Technical Responsible LAMAT: João Pousa Alves Filho, CREA-MG 0000168139D

SENAI Itaúna CETEF Marcelino Corradi

Rua Lilia Antunes, 99 - Bairro: Nogueira Machado - CEP: 35680-270

Itaúna - MG - Fone: (37) 3249-2400

Página 2 de 2

**Relatório de Análises Metalográficas***Relatório of Metallographic Analysis***Relatório de Ensaio / Test Report Nº: 11261/2018**

Solicitante / Client: CARLOS ADEMIR DA SILVA
Endereço / Address: AV. MONSENHOR LUIZ DE GONZAGA 103 - CENTRO - NEPOMUCENO - MG
Material / Material: Amostra para análise
Identificação do Cliente Peça 2 - A
Client Identification:

Dureza Vickers HV 10/20**Valores Encontrados / Found Values**

| Pontos Valores | Points Values |
|------------------|-----------------|
| 1 | 161,71 |
| 2 | 210,06 |
| 3 | 213,28 |
| 4 | 203,84 |
| 5 | 200,50 |

| Pontos Valores | Points Values |
|------------------|-----------------|
| 6 | 179,27 |
| 7 | 151,48 |
| 8 | --- |
| 9 | --- |
| 10 | --- |

| Pontos Valores | Points Values |
|------------------|-----------------|
| 11 | --- |
| 12 | --- |
| 13 | --- |
| 14 | --- |
| 15 | --- |

| Pontos Valores | Points Values |
|------------------|-----------------|
| 16 | --- |
| 17 | --- |
| 18 | --- |
| 19 | --- |
| 20 | --- |

| Valor Mínimo | Minimum Value |
|--------------|---------------|
| 151,48 | |

| Valor Médio | Average Value |
|-------------|---------------|
| 188,59 | |

| Valor Máximo | Maximum Value |
|--------------|---------------|
| 213,28 | |

Este relatório contém resultados que se referem exclusivamente à amostra enviada pelo solicitante e somente deve ser reproduzido por completo, sendo que a reprodução de partes requer aprovação escrita do LAMAT.

This report contain results refered exclusively specimens sent by requester and should only be full reproduced, and the reproductions of parts requires written approval of the LAMAT.

Observações / Observations:

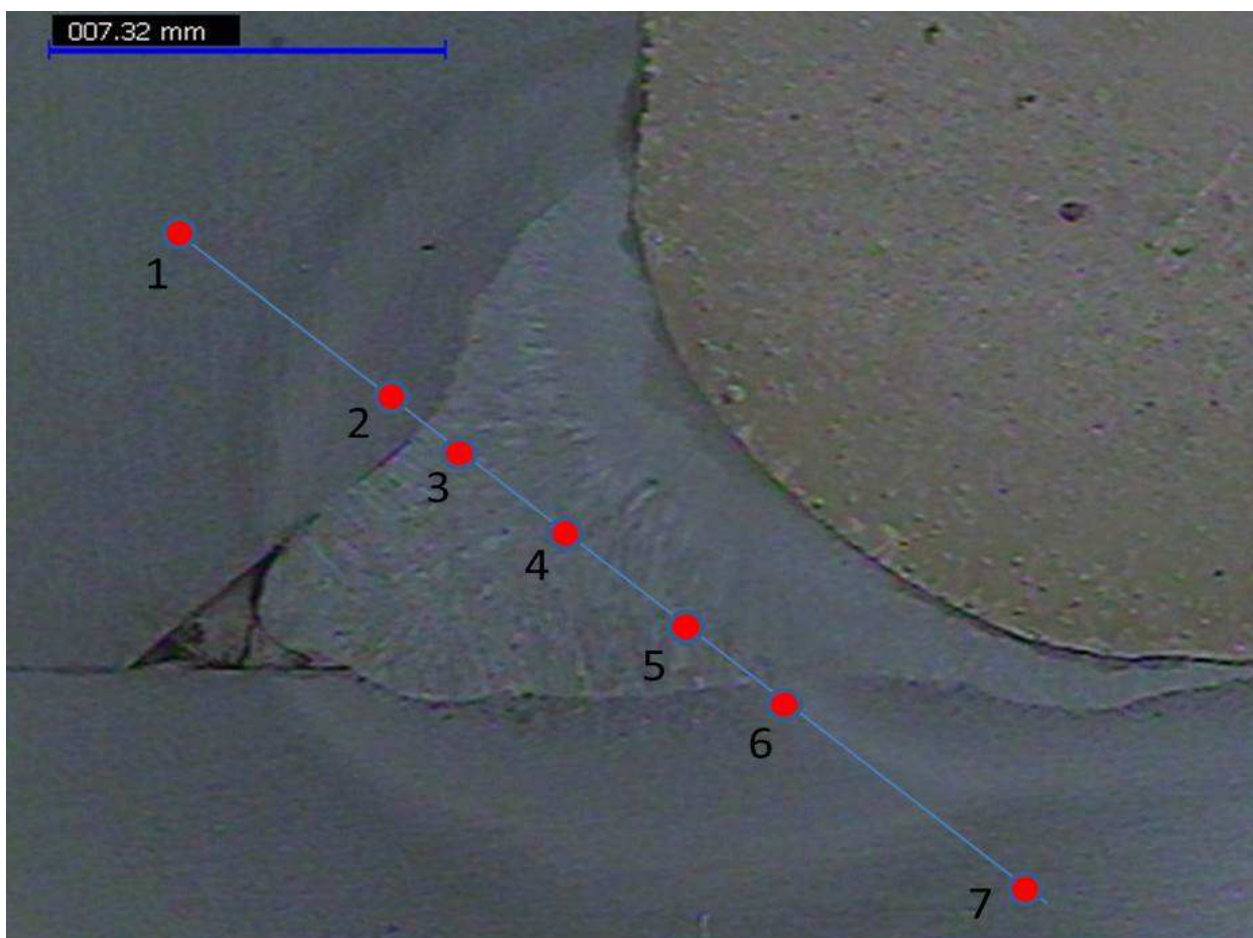
O valor médio corresponde as 7 impressões.
Penetrador : Pirâmide de diamante de base quadrada.
Força (N) : 98,040
Reativo: Nital 10%.
Aumento: 400x.
Temperatura: 21,9°C.
Carga: 10000 g
Norma de referência : ABNT NBR NM ISO 6507-1:2008.
Local de ensaio: Conforme orientação do cliente.

Equipamento utilizado: Microdurômetro Ótico Wolpert nº 62279 e Shimadzu nº 122514.



Relatório de Ensaio / Test Report Nº: 11261/2018

CROQUI / SKETCH



Recepção / Reception 11/10/18

Analista
Analyst

Responsável
Responsible

Realização / Achievement 22/10/18

Dualas Fernando Lopes
Laboratorista

Dualas Lopes

Emissão / Emission 22/10/18

Dualas Fernando Lopes
Laboratorista

Responsável Técnico LAMAT: João Pousa Alves Filho, CREA-MG 0000168139D

Technical Responsible LAMAT: João Pousa Alves Filho, CREA-MG 0000168139D

SENAI Itaúna CETEF Marcelino Corradi

Rua Lilia Antunes, 99 - Bairro: Nogueira Machado - CEP: 35680-270

Itaúna - MG - Fone: (37) 3249-2400

**Relatório de Análises Metalográficas***Relatório of Metallographic Analysis***Relatório de Ensaio / Test Report Nº: 11260/2018**

Solicitante / Client: CARLOS ADEMIR DA SILVA
Endereço / Address: AV. MONSENHOR LUIZ DE GONZAGA 103 - CENTRO - NEPOMUCENO - MG
Material / Material: Amostra para análise
Identificação do Cliente Peça 1 - B
Client Identification:

Dureza Vickers HV 10/20**Valores Encontrados / Found Values**

| Pontos Valores | |
|------------------|--------|
| Points Values | |
| 1 | 154,78 |
| 2 | 216,58 |
| 3 | 208,31 |
| 4 | 202,50 |
| 5 | 198,86 |

| Pontos Valores | |
|------------------|--------|
| Points Values | |
| 6 | 177,06 |
| 7 | 153,01 |
| 8 | --- |
| 9 | --- |
| 10 | --- |

| Pontos Valores | |
|------------------|-----|
| Points Values | |
| 11 | --- |
| 12 | --- |
| 13 | --- |
| 14 | --- |
| 15 | --- |

| Pontos Valores | |
|------------------|-----|
| Points Values | |
| 16 | --- |
| 17 | --- |
| 18 | --- |
| 19 | --- |
| 20 | --- |

| Valor Mínimo |
|---------------|
| Minimum Value |
| 153,01 |

| Valor Médio |
|---------------|
| Average Value |
| 187,30 |

| Valor Máximo |
|---------------|
| Maximum Value |
| 216,58 |

Este relatório contém resultados que se referem exclusivamente à amostra enviada pelo solicitante e somente deve ser reproduzido por completo, sendo que a reprodução de partes requer aprovação escrita do LAMAT.

This report contain results refered exclusively specimens sent by requester and should only be full reproduced, and the reproductions of parts requires written approval of the LAMAT.

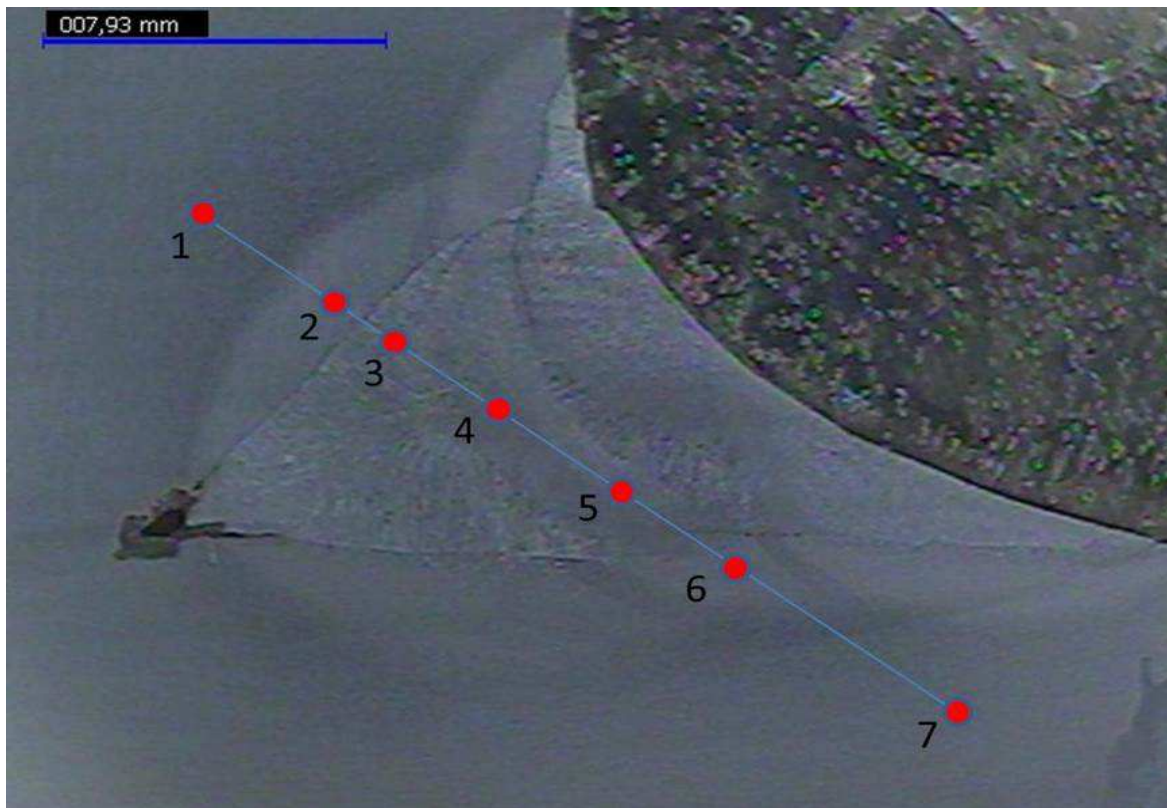
Observações / Observations:

O valor médio corresponde as 7 impressões.
Penetrador : Pirâmide de diamante de base quadrada.
Força (N) : 98,040
Reativo: Nital 10%.
Aumento: 400x.
Temperatura: 22,3°C.
Carga: 10000 g
Norma de referência : ABNT NBR NM ISO 6507-1:2008.
Local de ensaio: Conforme orientação do cliente.

Equipamento utilizado: Microdurômetro Ótico Wolpert nº 62279 e Shimadzu nº 122514.

Relatório de Ensaio / Test Report Nº: 11260/2018

CROQUI / SKETCH



Recepção / Reception 11/10/18

Analista
Analyst

Responsável
Responsible

Realização / Achievement 22/10/18

Dualas Fernando Lopes
Laboratorista

Dualas Lopes

Emissão / Emission 22/10/18

Dualas Fernando Lopes
Laboratorista

Responsável Técnico LAMAT: João Pousa Alves Filho, CREA-MG 0000168139D

Technical Responsible LAMAT: João Pousa Alves Filho, CREA-MG 0000168139D

SENAI Itaúna CETEF Marcelino Corradi

Rua Lilia Antunes, 99 - Bairro: Nogueira Machado - CEP: 35680-270

Itaúna - MG - Fone: (37) 3249-2400

**Relatório de Análises Metalográficas***Relatório of Metallographic Analysis***Relatório de Ensaio / Test Report Nº: 11259/2018**

Solicitante / Client: CARLOS ADEMIR DA SILVA
Endereço / Address: AV. MONSENHOR LUIZ DE GONZAGA 103 - CENTRO - NEPOMUCENO - MG
Material / Material: Amostra para análise
Identificação do Cliente Peça 1 - A
Client Identification:

Dureza Vickers HV 10/20**Valores Encontrados / Found Values**

| Pontos Valores | |
|------------------|--------|
| Points Values | |
| 1 | 159,35 |
| 2 | 216,58 |
| 3 | 218,07 |
| 4 | 211,49 |
| 5 | 212,92 |

| Pontos Valores | |
|------------------|--------|
| Points Values | |
| 6 | 206,57 |
| 7 | 181,80 |
| 8 | --- |
| 9 | --- |
| 10 | --- |

| Pontos Valores | |
|------------------|-----|
| Points Values | |
| 11 | --- |
| 12 | --- |
| 13 | --- |
| 14 | --- |
| 15 | --- |

| Pontos Valores | |
|------------------|-----|
| Points Values | |
| 16 | --- |
| 17 | --- |
| 18 | --- |
| 19 | --- |
| 20 | --- |

| Valor Mínimo |
|---------------|
| Minimum Value |
| 159,35 |

| Valor Médio |
|---------------|
| Average Value |
| 200,97 |

| Valor Máximo |
|---------------|
| Maximum Value |
| 218,07 |

Este relatório contém resultados que se referem exclusivamente à amostra enviada pelo solicitante e somente deve ser reproduzido por completo, sendo que a reprodução de partes requer aprovação escrita do LAMAT.

This report contain results refered exclusively specimens sent by requester and should only be full reproduced, and the reproductions of parts requires written approval of the LAMAT.

Observações / Observations:

O valor médio corresponde as 7 impressões.
Penetrador : Pirâmide de diamante de base quadrada.
Força (N) : 98,040
Reativo: Nital 10%.
Aumento: 400x.
Temperatura: 22,3°C.
Carga: 10000 g
Norma de referência : ABNT NBR NM ISO 6507-1:2008.
Local de ensaio: Conforme orientação do cliente.

Equipamento utilizado: Microdurômetro Ótico Wolpert nº 62279 e Shimadzu nº 122514.

Relatório de Ensaio / Test Report Nº: 11259/2018

CROQUI / SKETCH



Recepção / Reception 11/10/18

Analista
Analyst

Responsável
Responsible

Realização / Achievement 22/10/18

Dualas Fernando Lopes
Laboratorista

Dualas Lopes

Emissão / Emission 22/10/18

Dualas Fernando Lopes
Laboratorista

Responsável Técnico LAMAT: João Pousa Alves Filho, CREA-MG 0000168139D

Technical Responsible LAMAT: João Pousa Alves Filho, CREA-MG 0000168139D

SENAI Itaúna CETEF Marcelino Corradi

Rua Lilia Antunes, 99 - Bairro: Nogueira Machado - CEP: 35680-270

Itaúna - MG - Fone: (37) 3249-2400

Página 2 de 2

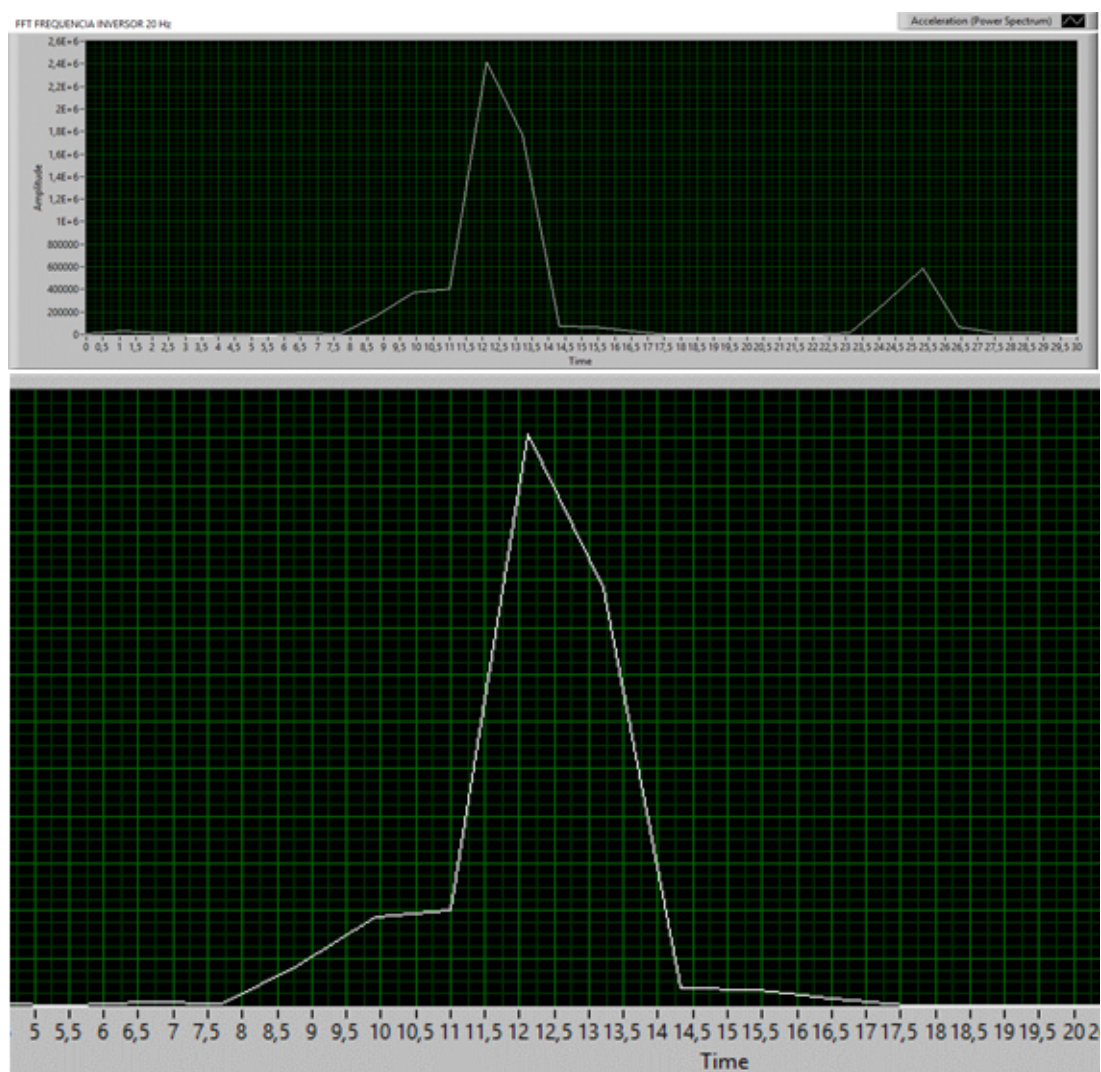
APÊNDICE B – Resultados das leituras de aceleração

Figura 1 – Calibração do inversor de frequência com a colhedora

| DADOS ACCELERÔMETRO | | | | | |
|-----------------------|--------------------------|---------------------------|-----------|-----------|-------|
| FREQUÊNCIA ANSYS (Hz) | FREQUÊNCIA INVERSOR (Hz) | FREQUÊNCIA COLHEDORA (Hz) | | | |
| | | REPLICA 1 | REPLICA 2 | REPLICA 3 | MÉDIA |
| 15,8 | 25 | 15,5 | 15,7 | 15,9 | 15,7 |
| 14,2 | 23 | 14,3 | 14,2 | 14,2 | 14,2 |
| 12,5 | 20 | 12,3 | 12,6 | 12,5 | 12,5 |

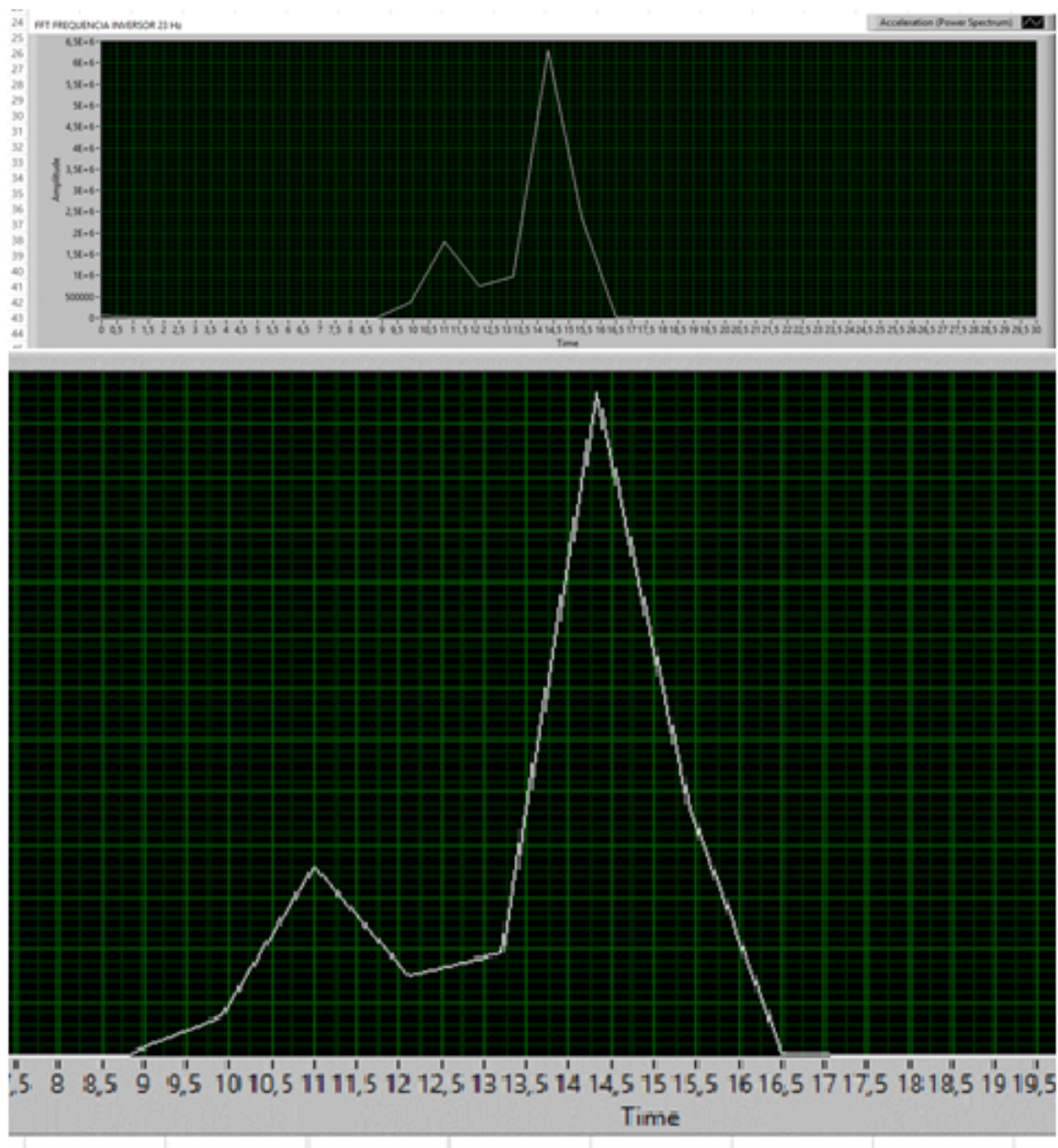
Fonte: Do autor (2019).

Figura 2 – Resultados do acelerômetro 20 Hz



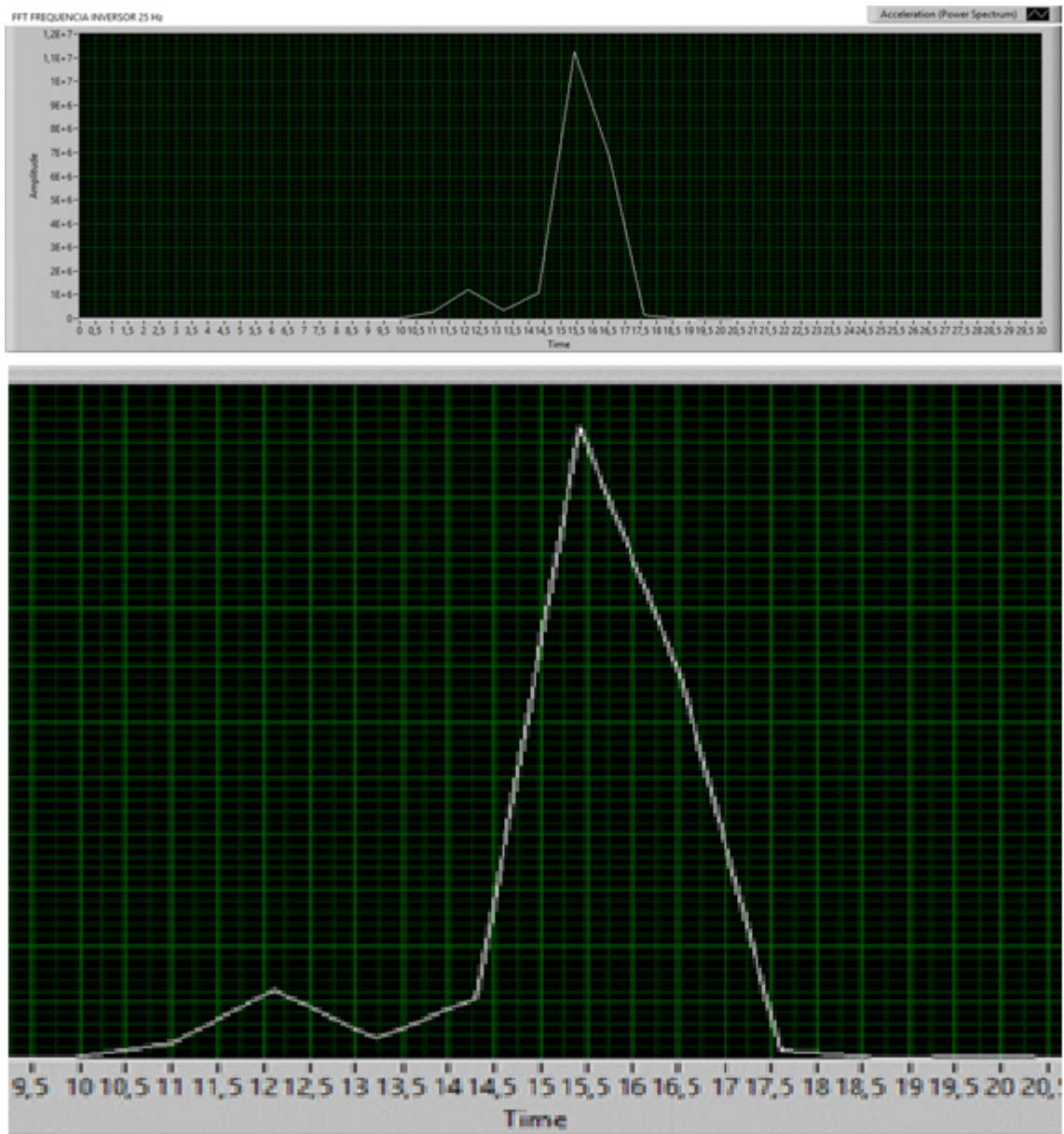
Fonte: Do autor (2019).

Figura 3 – Resultados do acelerômetro 23 Hz



Fonte: Do autor (2019).

Figura 4 – Resultados do acelerômetro 25 Hz



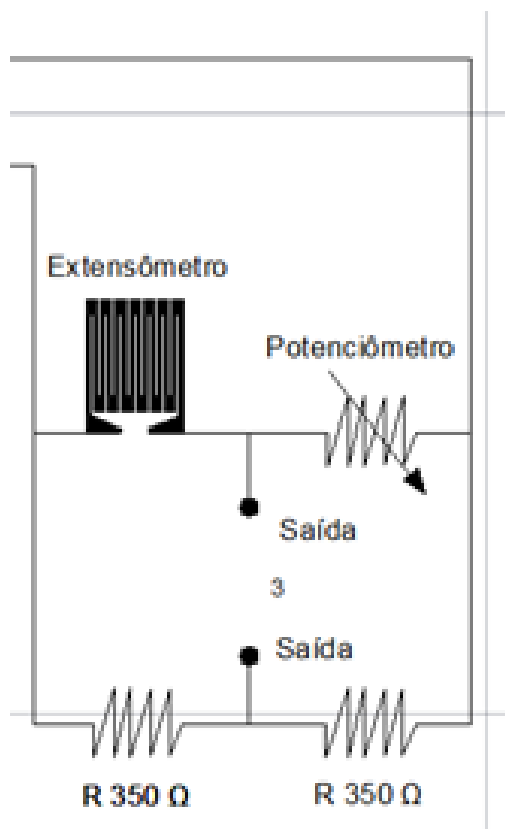
Fonte: Do autor (2019).

APÊNDICE C – Calibração e resultados das leituras de deformações

Ponte de Wheastone

Para realizar as leituras de deformações, foi confeccionada uma placa eletrônica contendo três pontes de Wheatstone a fim de alimentar os extensômetros, no intuito de registrar os dados de deformação no material, conforme Figura 1.

Figura 1 - Esquemas de configurações das Pontes de Wheatstone



Fonte: Do Autor

Com a utilização do multímetro Fluke 115 TRUE RMS realizou-se o ajuste das pontes de Wheatstone, até que a tensão equivalente em cada extensômetro sem deformação no material equivalesse a zero.

Preparação da viga de calibração e colagem extensômetros

A preparação consiste na fase principal do procedimento de calibração e deverá seguir um procedimento rigoroso para a obtenção de resultados replicáveis. Assim os materiais utilizados para a calibração e colagem dos extensômetros estão listados na Tabela 1, para que seja possível replicar todos os procedimentos aqui especificados e a reutilização em outros equipamentos.

Tabela 1- Lista de materiais para colagem extensômetros e funcionalidades.

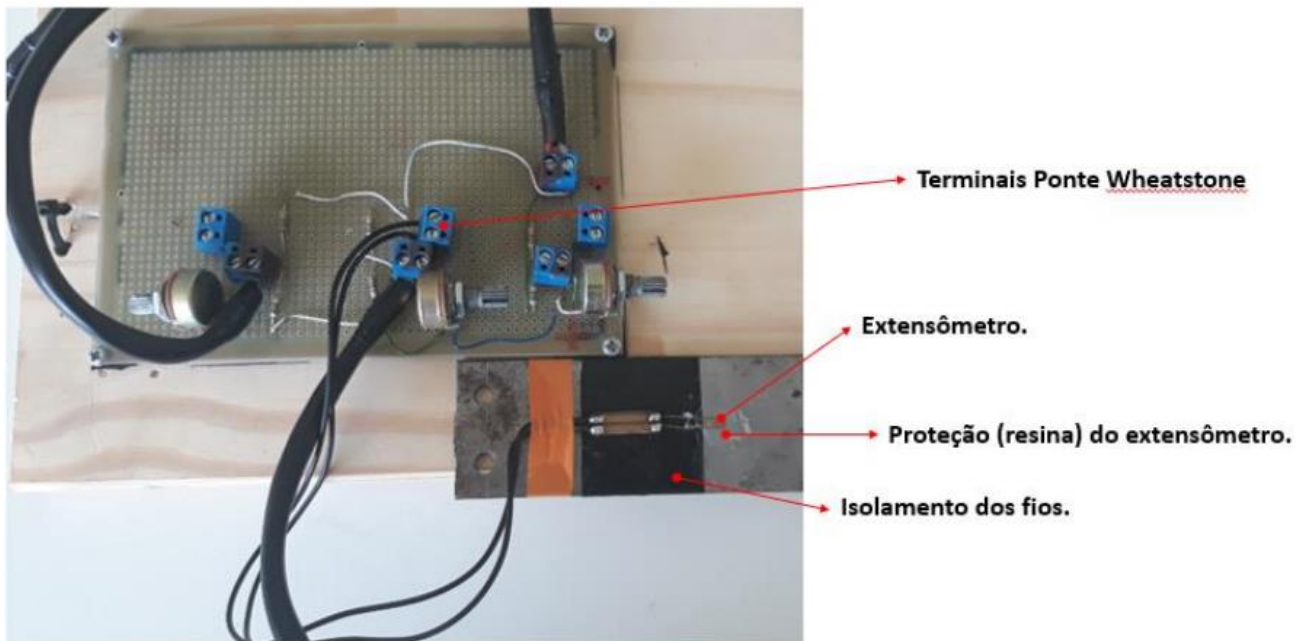
| Material | Quantidade | Unidade | Função |
|--|------------|---------|---|
| Strain Gauge Excel Sensor, modelo PA-06-060BA-350-LL | 2 | Unidade | Extensômetro |
| Viga Metálica | 1 | Unidade | Corpo de Prova |
| Lixa 100 | 1 | Unidade | Abrasão física preliminar |
| Lixa 320 | 1 | Unidade | Abrasão física intermediária |
| Lixa 600 | 1 | Unidade | Abrasão física de acabamento |
| Álcool isopropílico | 1/2 | Litro | Limpeza |
| Gazes | 1 | Caixa | Limpeza |
| Tesoura | 1 | Unidade | Auxílio para colagem e manuseio dos materiais |
| Traçador de altura | 1 | Unidade | Marcação do posicionamento do <i>strain gauge</i> |
| Riscador de ponta fixa metal duro | 1 | Unidade | Marcação do posicionamento do <i>strain gauge</i> |
| Pinça | 1 | Unidade | Auxílio manuseio dos extensômetros |
| Fita adesiva 48 mm | 1 | Rolo | Posicionamento dos extensômetros |
| Fita isolante | 1 | Rolo | Isolar fios do extensômetro em relação a viga |
| Resina Plástica | 1 | tubos | Proteger extensômetros |
| Espátula | 1 | Unidade | Manuseio da resina plástica |

O processo de colagem de um extensômetro consiste inicialmente na preparação da superfície para a remoção de resíduos e imperfeições da área de posicionamento do transdutor, afim de se evitar que causem interferências no procedimento de aquisição dos dados, para isso foram usados uma lixa média de numeração 100 na fase inicial do processo para remover as imperfeições superficiais do material, após isso utilizou-se a lixa 360 para retirar os riscos ocasionados pela lixa 100 e para finalizar utilizou-se a lixa 600 para acabamento da superfície, em uma fase subsequente empregou-se álcool e a gaze para limpeza química.

Após a fase de limpeza, iniciou-se o procedimento de marcação e alinhamento do local de posicionamento do extensômetro essa fase foi desenvolvida com o auxílio de um traçador de altura e um riscador de ponta fixa. Esta marcação está localizada no centro da viga metálica a uma distância de 122mm da extremidade de aplicação da carga. Terminando a fase de marcação, deu início a fase de colagem dos extensômetros. Nesta etapa foi cortado um pedaço de 5 cm da fita adesiva e com o auxílio da pinça o extensômetro foi pego por uma das bordas sem tocar no circuito, e foi posicionado sobre a fita de modo que ficasse preso. Pegou-se, então, a fita adesiva e a depositou sobre as demarcações da viga.

A última fase do processo de colagem do extensômetro consiste na fixação do extensômetro e o isolamento dos fios. iniciou-se o processo da fase depositando cola sobre viga em toda a área de contato do extensômetro. Após isso, a fita adesiva foi retirada e averiguou-se se não haviam irregularidades como bolhas ou posicionamento errôneo. Após o processo de colagem do extensômetro os fios foram conectados aos terminais da ponte de Wheatstone conforme Figura 2.

Figura 2 Ligação do extensômetro à Ponte de Wheatstone.



Fonte: Do autor

Definição do sistema de aquisição de dados

Foi utilizados os hardwares NI 9237 e NI 9949 da National Instruments que serve para o condicionamento de sinal necessário e alimentar e medir até quatro sensores baseados na ponte simultaneamente. O software que foi usado para a comunicação com os hardwares é o LabView especificamente a versão 16.0f2. A configuração dos hardwares e do software foi feita conforme indicação do manual do fabricante que estabelece um quarto de ponte de Wheatstone.

Máquina de ensaio

A máquina de ensaio utilizada foi a EMIC 23-20 da marca Instron nacional. À esta máquina está acoplada uma célula de carga com capacidade de 5kN. A Série 23 é uma linha de máquinas universais diferenciada das demais do mercado pois sua construção mecânica é feita com sistema de rolamentos pré-tensionados, fusos e colunas guias maiores e sistema de transmissão por polias sincronizadas, aumentando a rigidez e diminuindo folgas as especificações gerais, dimensões e características da máquina 23-20 pode ser observado na Figura 3 . O equipamento foi devidamente calibrada com o software correspondente à máquina de ensaio executou a aplicação das cargas sobre a viga.

Figura 3- Modelos e especificações

| Modelos Dupla Coluna de Bancada | | 23-5D | 23-10 | 23-20 |
|---------------------------------|--------|-------|-------|-------|
| Capacidade de Carga | kN | 5 | 10 | 20 |
| Velocidade Máxima de Ensaio | mm/min | 500 | 500 | 500 |
| Velocidade Mínima de Ensaio | mm/min | 0,005 | 0,005 | 0,005 |
| Velocidade Retorno Pós Ensaio | mm/min | 600 | 600 | 600 |
| Curso Máximo | mm | 1122 | 1122 | 1122 |
| Espaçamento entre Colunas | mm | 420 | 420 | 420 |
| Altura | mm | 1582 | 1582 | 1582 |
| Largura | mm | 756 | 756 | 756 |
| Profundidade | mm | 707 | 707 | 707 |
| Peso | kg | 110 | 110 | 110 |
| Potência Máxima | VA | 300 | 300 | 600 |

* Painel Dashboard Industrial Touchscreen Opcional



23-5D, 23-10, 23-20

Fonte: (INSTRON, 2019)

Experimento de Calibração

Durante o experimento coletou-se os valores de deformação específica por meio da leitura do extensômetro para cada carga aplicada à viga. Conforme pode ser observado na Figura 4, o setup do experimento consiste na montagem do dispositivo de engaste da viga logo abaixo do eixo de aplicação da carga, de modo que, a carga seja aplicada na extremidade da viga. O controle da carga aplicada foi feito por intermédio do software da máquina de ensaio. A coleta de dados foi realizada por meio do software de comunicação (LabView) e dos hardwares NI 9237 e NI 9949 especificado anteriormente.

Figura 4 - Setup experimento de calibração



1 Controle da carga aplicada.

2 Eixo de aplicação da carga.

3 Dispositivo com a viga engastada.

4 Hardware NI 9237.

5 Hardware NI 9949.

6 Software de comunicação (LabView) com o sistema de aquisição de dados.

Fonte: Do autor

Foram realizados cinco vezes o experimento, de modo que, cada vez utilizou-se de um ranger de 10 à 70N com intervalo entre as leitoras de 10 N, coletando-se as leituras médias encontradas e a cada medição realizada, optou-se por fazer o procedimento de calibração do extensômetro disponível no software LabView.

Cálculo analítico utilizado para validação do experimento

Para validação do experimento foi realizado o cálculo analítico das deformações específicas para o mesmo valor de cada carga aplicada. A equação que determina o processo de deformação leva em consideração a Lei de Hooke especificada no fundamento teórico deste trabalho, contanto que a deformação compreenda a região elástica, devido a linearidade entre tensão e deformação. O método analítico para determinação da deformação de um corpo de prova, levou em consideração o formato do corpo e suas condições de liberdade (corpo livre, engastado, bi apoiado, etc) nesse experimento utilizou-se uma viga engastada conforme Figura 5. Assim os valores de deformação obtidos no cálculo analítico foram comparados com os valores do experimento.

Figura 5 - Implemento com viga metálica engastada



Fonte: Do autor

Resultados e Discussão da calibração extensômetro

Os resultados de deformação do cálculo analítico e do experimento estão apresentados na Tabela 2. A maior diferença encontrada entre o erro médio das réplicas foi de apenas 5,7% para a carga de 10 N e erro global da diferença entre as deformações calculada e do experimento foi de 3,8%. Estes resultados demonstraram boa repetibilidade entre as medições realizadas e também demonstram a concordância em relação ao cálculo analítico.

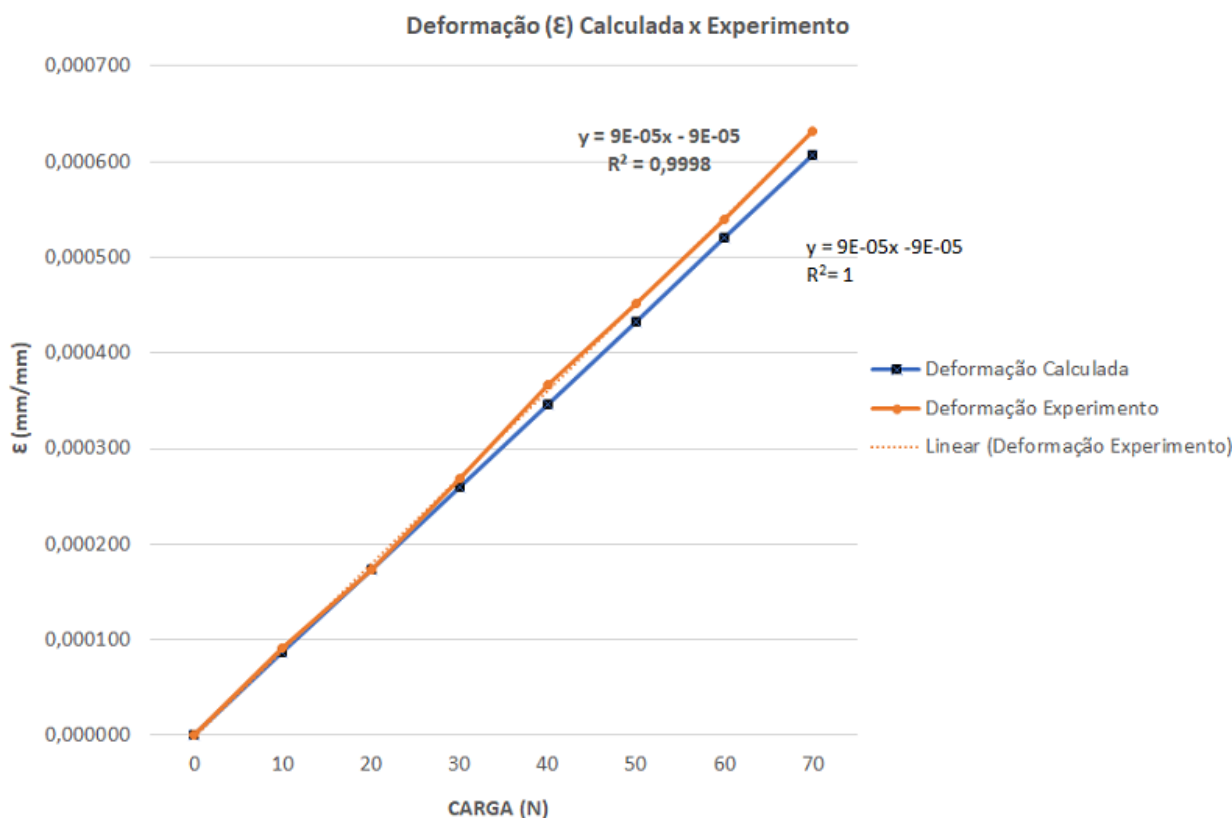
Tabela 2 - Resultado das deformações calculada e do experimento.

| Carga(N) | ϵ (mm/mm) Calculada | ϵ (mm/mm) Média Experimental | % média de erro entre experimento | %diferença entre ϵ calculado e experimental |
|-----------------------|---------------------------------|---|--------------------------------------|---|
| 0 | 0,000000 | 0,000000 | 0,0% | 0,0% |
| 10 | 0,000087 | 0,000092 | 5,7% | 5,8% |
| 20 | 0,000173 | 0,000174 | 4,2% | 0,4% |
| 30 | 0,000260 | 0,000268 | 4,4% | 3,0% |
| 40 | 0,000347 | 0,000366 | 5,2% | 5,3% |
| 50 | 0,000433 | 0,000452 | 4,1% | 4,2% |
| 60 | 0,000520 | 0,000540 | 4,4% | 3,7% |
| 70 | 0,000606 | 0,000632 | 4,4% | 4,1% |
| Erro Global(%) | | | | 3,8% |

Fonte: Do autor

O gráfico com as curvas de ajuste linear das deformações calculada e do experimento está apresentado na Figura 6. Ao analisar a curva de deformação do experimento, a correlação entre os dados é justificada pelo valor do coeficiente de determinação (R²), responsável por indicar o quanto o modelo se ajusta aos dados observados no experimento. O coeficiente de determinação varia entre zero (0) e um (1), e quanto mais próximo de um (1), mais representativo é o modelo. O experimento apresentou um R² de 0,9998, o que é muito próximo de um (1). O mesmo valor do coeficiente de determinação foi encontrado por Marcelino et al. (2016) durante a aplicação da ponte de Wheatstone com extensômetros elétricos na instrumentação de um link para medições das forças de tração e compressão.

Figura 6 - Gráfico de carga versus deformação para abordagem analítica e experimental.



Fonte: Do autor

A linearidade dos valores obtidos no experimento mostra concordância com a Lei de Hooke aplicada ao material para deformações dentro da região elástica do material e assim permitiu a validação do sistema de medição proposto.

Por meio da análise dos resultados comprovou-se que o procedimento empregado durante a preparação da viga e colagem do extensômetro mostrou-se adequado.

A utilização de um potenciômetro na construção da ponte de Wheatstone possibilitou o procedimento de equilíbrio de tensões da ponte garantindo assim maior assertividade na coleta de dados.

A utilização do extensômetro para medidas de força e deformação mostrou-se uma opção vantajosa ao apresentar linearidade em resposta as aplicações de carga. Além disto, o extensômetro tem baixo custo de aquisição e pode ser utilizado em diversas aplicações para medição de força e deformação.

O sistema de medição validado também pode ser utilizado para determinar as propriedades mecânicas de um material, em especial a curva de tensão-deformação. É importante ressaltar que os valores de carga aplicada ao objeto de estudo não deve ultrapassar o limite elástico do material. Assim esse procedimento será adaptado e empregado no diagnóstico de falha do cilindro vibrador de uma colhedora de café em escala 1:3.

Figura 5 – Resultados dos extensômetros direções em uma frequência de 12.5 Hz

| Dados de Entrada | | | Frequência 12.5 Hz (20) | | | | | |
|---|----------------------------|---------|-------------------------|---------|---------|---------|---------|----------------|
| Descrição | Formula | Unidade | Réplica | Réplica | Réplica | Réplica | Réplica | Média |
| Deformação Específica (ε) | Leitura Extensom | mm/mm | 0,00003 | 0,00003 | 0,00003 | 0,00002 | 0,00003 | 0,00003 |
| Tensão (σ) | $\sigma = \varepsilon * E$ | MPa | 6 | 6 | 6 | 4 | 6 | 5,6 |
| Erro Sistemático | - | - | 0,02002 | 0,02000 | 0,02001 | 0,02001 | 0,02000 | - |
| Leitura Extensômetro | - | - | 0,02005 | 0,02003 | 0,02004 | 0,02003 | 0,02003 | - |

| Dados de Entrada | | | Frequência 12.5 Hz (20) | | | | | |
|---|----------------------------|---------|-------------------------|---------|---------|---------|---------|----------------|
| Descrição | Formula | Unidade | Réplica | Réplica | Réplica | Réplica | Réplica | Média |
| Deformação Específica (ε) | Leitura Extensom | mm/mm | 0,00005 | 0,00006 | 0,00005 | 0,00005 | 0,00005 | 0,00005 |
| Tensão (σ) | $\sigma = \varepsilon * E$ | MPa | 10 | 12 | 10 | 10 | 10 | 10,4 |
| Erro Sistemático | - | - | 0,02000 | 0,02008 | 0,02003 | 0,02001 | 0,02003 | - |
| Leitura Extensômetro | - | - | 0,02005 | 0,02014 | 0,02008 | 0,02006 | 0,02008 | - |

| Dados de Entrada | | | Frequência 12.5 Hz (20) | | | | | |
|---|----------------------------|---------|-------------------------|---------|---------|---------|---------|----------------|
| Descrição | Formula | Unidade | Réplica | Réplica | Réplica | Réplica | Réplica | Média |
| Deformação Específica (ε) | Leitura Extensom | mm/mm | 0,00002 | 0,00002 | 0,00003 | 0,00002 | 0,00002 | 0,00002 |
| Tensão (σ) | $\sigma = \varepsilon * E$ | MPa | 4 | 4 | 6 | 4 | 4 | 4,4 |
| Erro Sistemático | - | - | 0,02002 | 0,02003 | 0,02002 | 0,02000 | 0,02003 | - |
| Leitura Extensômetro | - | - | 0,02004 | 0,02005 | 0,02005 | 0,02002 | 0,02005 | - |

Fonte: Do autor (2019).

Figura 6 – Resultados dos extensômetros direções em uma frequência de 14.2 Hz

| Dados de Entrada | | | ENSÔMERO POSIÇÃO 1 | | | | | |
|---|----------------------------|---------|-------------------------|---------|---------|---------|---------|----------------|
| | | | Frequência 14.2 Hz (23) | | | | | |
| Descrição | Formula | Unidade | Réplica | Réplica | Réplica | Réplica | Réplica | Média |
| Deformação Específica (ε) | Leitura Extensom | mm/mm | 0,00004 | 0,00004 | 0,00004 | 0,00005 | 0,00004 | 0,00004 |
| Tensão (σ) | $\sigma = \varepsilon * E$ | MPa | 8 | 8 | 8 | 10 | 8 | 8,4 |
| Erro Sistemático | - | - | 0,02002 | 0,02001 | 0,02001 | 0,02000 | 0,02003 | - |
| Leitura Extensômetro | - | - | 0,02006 | 0,02005 | 0,02005 | 0,02005 | 0,02007 | - |

| Dados de Entrada | | | ENSÔMERO POSIÇÃO 2 | | | | | |
|---|----------------------------|---------|-------------------------|---------|---------|---------|---------|----------------|
| | | | Frequência 14.2 Hz (23) | | | | | |
| Descrição | Formula | Unidade | Réplica | Réplica | Réplica | Réplica | Réplica | Média |
| Deformação Específica (ε) | Leitura Extensom | mm/mm | 0,00006 | 0,00005 | 0,00006 | 0,00006 | 0,00006 | 0,00006 |
| Tensão (σ) | $\sigma = \varepsilon * E$ | MPa | 12 | 10 | 12 | 12 | 12 | 11,6 |
| Erro Sistemático | - | - | 0,02002 | 0,02004 | 0,02002 | 0,02001 | 0,02000 | - |
| Leitura Extensômetro | - | - | 0,02008 | 0,02009 | 0,02008 | 0,02007 | 0,02006 | - |

| Dados de Entrada | | | ENSÔMERO POSIÇÃO 3 | | | | | |
|---|----------------------------|---------|-------------------------|---------|---------|---------|---------|----------------|
| | | | Frequência 14.2 Hz (23) | | | | | |
| Descrição | Formula | Unidade | Réplica | Réplica | Réplica | Réplica | Réplica | Média |
| Deformação Específica (ε) | Leitura Extensom | mm/mm | 0,00004 | 0,00003 | 0,00003 | 0,00003 | 0,00003 | 0,00003 |
| Tensão (σ) | $\sigma = \varepsilon * E$ | MPa | 8 | 6 | 6 | 6 | 6 | 6,4 |
| Erro Sistemático | - | - | 0,02002 | 0,02001 | 0,02002 | 0,02001 | 0,02002 | - |
| Leitura Extensômetro | - | - | 0,02006 | 0,02004 | 0,02005 | 0,02004 | 0,02005 | - |

Fonte: Do autor (2019).

Figura 7 – Resultados dos extensômetros direções em uma frequência de 15.8 Hz

| Dados de Entrada | | | Frequência 15.8 Hz (25) | | | | | |
|--------------------------------------|-------------------------|---------|-------------------------|---------|---------|---------|---------|----------------|
| Descrição | Formula | Unidade | Réplica | Réplica | Réplica | Réplica | Réplica | Média |
| Deformação Específica (ϵ) | Leitura Extensom | mm/mm | 0,00004 | 0,00005 | 0,00004 | 0,00005 | 0,00005 | 0,00005 |
| Tensão (σ) | $\sigma = \epsilon * E$ | MPa | 8 | 10 | 8 | 10 | 10 | 9,2 |
| Erro Sistemático | - | - | 0,02002 | 0,02002 | 0,02000 | 0,02001 | 0,02002 | - |
| Leitura Extensômetro | - | - | 0,02006 | 0,02007 | 0,02004 | 0,02006 | 0,02007 | - |

| Dados de Entrada | | | Frequência 15.8 Hz (25) | | | | | |
|--------------------------------------|-------------------------|---------|-------------------------|---------|---------|---------|---------|----------------|
| Descrição | Formula | Unidade | Réplica | Réplica | Réplica | Réplica | Réplica | Média |
| Deformação Específica (ϵ) | Leitura Extensom | mm/mm | 0,00007 | 0,00007 | 0,00007 | 0,00007 | 0,00007 | 0,00007 |
| Tensão (σ) | $\sigma = \epsilon * E$ | MPa | 14 | 14 | 14 | 14 | 14 | 14,0 |
| Erro Sistemático | - | - | 0,02000 | 0,02002 | 0,01997 | 0,02001 | 0,02002 | - |
| Leitura Extensômetro | - | - | 0,02007 | 0,02009 | 0,02004 | 0,02008 | 0,02009 | - |

| Dados de Entrada | | | Frequência 15.8 Hz (25) | | | | | |
|--------------------------------------|-------------------------|---------|-------------------------|---------|---------|---------|---------|----------------|
| Descrição | Formula | Unidade | Réplica | Réplica | Réplica | Réplica | Réplica | Média |
| Deformação Específica (ϵ) | Leitura Extensom | mm/mm | 0,00005 | 0,00004 | 0,00004 | 0,00004 | 0,00004 | 0,00004 |
| Tensão (σ) | $\sigma = \epsilon * E$ | MPa | 10 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8,4 |
| Erro Sistemático | - | - | 0,02002 | 0,02001 | 0,02002 | 0,02001 | 0,02000 | - |
| Leitura Extensômetro | - | - | 0,02007 | 0,02005 | 0,02006 | 0,02005 | 0,02004 | - |

Fonte: Do autor (2019).